

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»
Академия электротехнических наук Российской Федерации

МАТЕРИАЛЫ

Международной научно-технической конференции

«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ»

(XIX Бенардосовские чтения)

посвящена 175-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса

31 мая – 2 июня

II том
Теплоэнергетика

Иваново 2017

В II томе материалов конференции представлены статьи, отражающие результаты научных исследований в области тепловых и атомных электрических станций; промышленная теплоэнергетика; теплообмен в теплотехнологических установках и процессах; систем управления и автоматизации; рассмотрены вопросы математических методов в технике и технологиях.

Редакционная коллегия:

Тарарыкин С.В., ректор, д.т.н., профессор – председатель;
Тютиков В.В., проректор по НР, д.т.н., профессор;
Шуин В.А., каф. АУЭС, д.т.н., профессор;
Казakov Ю.Б., зав каф. ЭМ, д.т.н., профессор;
Полетаев В.А., каф. ТМС, д.т.н., профессор;
Косяков С.В., зав. каф. ПОКС, д.т.н., профессор;
Колибаба В.И., зав. каф. ЭиОП, д.э.н., профессор;
Бушуев Е.Н., д.т.н., профессор каф. ХХТЭ;
Клюнина С.В., начальник УИУНЛ.

СЕКЦИЯ 4.

«СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ»

УДК 681.5.01; 681.5.017

И.К. МУРАВЬЕВ¹, ст. преподаватель,
Ю.С.ТВЕРСКОЙ², д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: igor3724@mail.ru¹, tverskoy@su.ispu.ru²

К вопросу решения задачи эффективного управления энергоблоками с ПГУ

Аннотация. Целью работы является исследование вопросов решения задачи эффективного управления энергоблоками с ПГУ в широком диапазоне нагрузок при изменяющихся климатических факторах.

Ключевые слова: парогазовые установки, эффективность энергоблока, внешние климатические факторы, автоматическая система регулирования.

I.K. MURAVEV, senior teacher,
Yu.S. TVERSKOY, doctor of engineering, professor
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: igor3724@mail.ru¹, tverskoy@su.ispu.ru²

To the issue of solving the problem of efficient control of power units with CCGTs

Abstract. The aim of the work is to research the issues of solving the problem of efficient control of power units with CCGT in a wide range of loads under changing climatic factors.

Key words: combined-cycle plants, efficiency of the power unit, external climatic factors, automatic control system.

За последние десять лет в российской электроэнергетике введено в эксплуатацию более 40 парогазовых энергоблоков различной мощности. Опыт эксплуатации показывает, что в работе парогазовых установок имеется большое количество «узких» мест и субъективных факторов, которые существенно влияют на экономическую эффективность и эксплуатационную надежность оборудования [1-5].

Проблема освоения ПГУ является центральной темой работ ведущих организаций страны (ОАО «ВТИ», ОАО «Фирма ОРГРЭС», НИУ «МЭИ», ИГЭУ, УГАТУ, ЗАО «Интеравтоматика», АО «НПЦ газотурбостроения «САЛЮТ» и др.), а также зарубежных компаний (Siemens, Alstom, Mitsubishi, General Electric и др.).

Трудности решения задачи эффективного управления энергоблоками с ПГУ в широком диапазоне нагрузок при изменяющихся климатических факторах определяется необходимостью совместного решения, по меньшей мере, трех проблем.

Первая проблема связана с физическими особенностями построения непосредственно тепловых схем современных ПГУ, содержащих активную газотурбинную часть (ГТУ) с встроенной САУ подачи топлива в камеру сгорания (КС) и воздуха в компрессор и пассивную утилизационную часть (КУ и ПТ) с полным, практически, отсутствием управления тепловой нагрузкой котла-утилизатора (КУ) и мощности паровой турбины (ПТ).

Однако без полноценной работы утилизационной части не может быть достигнута расчетная эффективность ПГУ в целом. Предпринимаются попытки решения этой проблемы конструктивными мероприятиями. Например, путем введения в тепловую схему ПГУ разного рода дожигающих устройств. Однако одними конструктивными мероприятиями, как известно, невозможно достигнуть желаемых результатов.

Вторая проблема определяется критичностью работы ПГУ к изменениям нагрузки блока и к климатическим условиям.

Большинство параметров ПГУ взаимосвязаны по термодинамическому циклу, и изменение одного из них влечет за собой изменение других параметров. В реальных условиях эксплуатации практически невозможно провести корректные эксперименты по оценке влияния внешних климатических факторов на эффективность работы технологического оборудования.

Практически единственный путь, который позволяет выполнить поиск и анализ критических факторов влияния параметров наружного воздуха на эффективность энергоблока, это математическое моделирование и постановка соответствующих вычислительных экспериментов.

Третья проблема связана с необходимостью строгого обоснования вектора управляемых координат сложного технологического объекта управления (ТОУ), работающего в системообразующей структуре АСУТП энергоблока с ПГУ.

Известно, что информационный масштаб современных АСУТП (более 1-2 тыс. точек контроля) имеет опытно-коммерческое происхождение и в целом теоретически не обоснован. Поиск представительных сигналов для решения физических проблем структурного синтеза САУ, всегда требовал проведения уникальных исследований.

Для получения совместного решения этого комплекса взаимосвязанных проблем авторы применили следующий подход.

Во-первых, для поиска ответа на вопрос «Какие параметры ПГУ необходимо контролировать?» были использованы методы обобщенного термодинамического анализа эффективности сложных систем.

В результате для энергоблока с ПГУ впервые было дано достаточно строгое теоретическое обоснование вектора обобщенных термодинамических координат управляемого объекта.

Во-вторых, с учетом найденного вектора обобщенных термодинамических координат управляемого объекта были сформулированы дополнительные требования к построению математической модели и создан специальный полимодельный комплекс для постановки вычислительных экспериментов [6, 7]

В-третьих, решалась задача верификации полимодельного комплекса.

Для решения этой задачи в работе разработана методика оценки меры адекватности нелинейных математических моделей в широком диапазоне нагрузок с привлечением трендов контролируемых параметров из архива АСУТП энергоблока [8].

В-четвертых, были проведены поисковые исследования ключевых факторов, оказывающих существенное влияние на нарушение расчетного режима работы ГТУ, КУ, ПТ и энергоблока ПГУ в целом [7, 9].

В-пятых, рассмотрены принципы структурных построений АСР подачи топлива и воздуха для эффективного управления ГТУ и ее утилизационной части. Вскрыты особенности альтернативных вариантов АСР мощности энергоблока с ПГУ [10].

Литература

1. **Ольховский, Г.Г.** Парогазовые установки: вчера, сегодня, завтра (обзор) // Теплоэнергетика. 2016. №7. С. 38-45.
2. **Давыдов, А.В.** Опыт освоения парогазовых энергоблоков ПГУ-450Т / А.В. Давыдов, Ю.А. Радин // Электрические станции. 2009. № 9. С. 22–26.
3. **Аракелян, Э.К.** Методические положения учета особенностей ПГУ при оптимальном распределении тепловой и электрической нагрузки на ТЭЦ со сложным составом оборудования / Э.К. Аракелян, А.В. Андрушин, С.Ю. Бурцев, К.А. Андрушин, С.Р. Хуршудян // Теплоэнергетика. – 2015. – №5. – С. 27-32.
4. **Мельникова, Н.С.** Определение расхода воздуха через двигатель в полете в реальном масштабе времени для использования в перспективных законах управления / Н.С. Мельникова // Вестник УГАТУ. – Уфа, 2010. – Т.14, №4 (39). – С. 36-41.
5. **Будаков, И.В.** Расчетно-аналитические исследования воздухозаборного тракта газотурбинной установки ГТЭ-110 / И.В. Будаков, В.А. Буданов // Вестник ИГЭУ. – 2015. Вып.3. – С. 12-19.
6. **Муравьев И.К.** Этапы поиска и результаты исследования факторов влияния параметров внешней среды на эффективность энергоблоков ПГУ // Тез. докладов: «Состояние и перспективы развития электротехнологии» («XVIII Бенардосовские чтения»), Иваново, 2015. – Том 2. – С. 270-273.
7. **Тверской Ю.С., Муравьев И.К.** Об одном способе обеспечения расчетной эффективности энергоблоков ПГУ // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2015. – Вып.1. – С. 30-36.
8. **Тверской Ю.С., Муравьев И.К.** Технология разработки и оценка адекватности имитационной модели энергоблока ПГУ при изменении режимных и внешних факторов / Сб. трудов: ИММОД-2015, М.: ФГБУН «Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова», 2015. – Том 2. – С. 357-360.

9. **Муравьев, И.К.** Исследование на математической модели эффективности совместной работы газовой и паровой турбины энергоблока с ПГУ / Ю.С. Тверской, И.К. Муравьев // Автоматизация в промышленности. – 2016. - №1. – С.53-57.

10. **Тверской, Ю.С.** Совершенствование системы регулирования расхода воздуха в компрессор газотурбинных установок блоков ПГУ с учетом изменяющихся режимных и внешних климатических факторов / Ю.С. Тверской, И.К. Муравьев // Автоматизация в промышленности. – 2016. – №8. – С.61-64.

УДК 621.311.22

И.А. СТЕПИН¹, младший научный сотрудник,
А.Г. ЧАПЛИН, научный сотрудник

Всероссийский дважды ордена трудового красного знамени теплотехнический
научно-исследовательский институт
115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14
E-mail: IASepin@vti.ru¹

Результаты испытаний газотурбинных установок по проверке соответствия требованиям нормированного первичного регулирования частоты

Аннотация. В статье представлено краткое описание проведенных впервые в России испытаний на газотурбинных установках (ГТУ) по проверке соответствия требованиям нормированного первичного регулирования частоты (НПРЧ).

Ключевые слова: испытания, энергоблок, автоматическое управление, нормированное первичное регулирование частоты

I.A. STEPIN¹, research fellow,
A.G. CHAPLIN, research fellow

All-Russia Thermal Engineering Institute
Moscow, Russia, 115280, 14 Avtozavodskaya Str.
E-mail: IASepin@vti.ru¹

The results of the testing of gas turbine installations for verification of compliance of the requirements of the normalized primary frequency control

Abstract: the article presents a brief description of undertaken first in Russia to test gas turbine units on the compliance of the normalized primary frequency control.

Keywords: testing, unit, automatic control, normalized primary frequency regulation

Краткие сведения об НПРЧ

Регулирование частоты в энергосистеме – процесс поддержания частоты переменного тока в энергосистеме в допустимых пределах. Частота является одним из важнейших показателей качества электрической энергии и важнейшим параметром, характеризующим надежность режима энергосистемы. Она характеризует баланс вырабатываемой и потребляемой активной мощности. При его нарушении частота изменяется.

Если частота в энергосистеме снижается, то необходимо увеличить вырабатываемую на электростанциях активную мощность для восстановления нормального значения частоты. В соответствии с [1] частота должна находиться в пределах $50,0 \pm 0,2$ Гц не менее 95 % времени суток, не выходя за предельно допустимые $50,0 \pm 0,4$ Гц.

Нормированное первичное регулирование частоты (НПРЧ) – организованный часть первичного регулирования, осуществляемая выделенными для этих целей электростанциями, на которых размещены первичные резервы и обеспечено их эффективное использование. Для подтверждения требованиям НПРЧ на генерирующем оборудовании проводятся сертификационные испытания [2, 3, 4].

В настоящее время в НПРЧ участвует более 50 энергоблоков ТЭС, из них около 10 парогазовых. В декабре 2016 г. специалистами ОАО «ВТИ» были впервые проведены сертификационные испытания по проверке соответствия требованиям НПРЧ на трех ГТУ Новокуйбышевской ТЭЦ-1. Раньше испытания НПРЧ проводились на ГТУ только в составе блоков ПГУ.

Объект испытаний

В состав основного оборудования Новокуйбышевской ТЭЦ-1 входит:

- оборудование первой очереди (паровые энергетические котлы типов ТП-170, ТП-130 и паровые турбины типов ВПТ-25-3, ВР-22-2, ВТ-25-5, Тп-35/40-8,8, работающие по схеме с поперечными связями по пару и воде);
- оборудование новых ГТУ (три ГТУ PG6111FA («General Electric Company») и три паровых утилизирующих котельных агрегата КГТ-119/10.0-510-18/0.8-210 (ЗАО «Энергомаш (Белгород) - БЗЭМ»), работающих на общий паровой коллектор первой очереди), на котором проводились испытания по проверке соответствия требованиям НПРЧ.

Каждая газотурбинная установка PG6111FA с генератором 6FA номинальной мощностью 76,5 МВт предназначена для выработки электрической энергии за счет сжигания топлива (природного газа). ГТУ PG6111FA – одновальный осевой турбоагрегат, оснащенный 18-ступенчатым компрессором с одним рядом поворотных направляющих лопаток на входе в компрессор, шестью камерами сгорания, а также трехступенчатой турбиной с воздушным охлаждением на всех сопловых ступенях и на двух первых рабочих колёсах.

Система автоматического управления (САУ) мощностью ГТУ Новокуйбышевской ТЭЦ-1 реализована на базе программно-технического комплекса «Mark VIe» («General Electric Company») с помощью языка релейных схем.

Сигнал задания по электрической мощности формируется в регуляторе активной мощности газовой турбины, который формирует управляющее воздействие на подсистему регулирования расхода топливного газа в зависимости от небаланса между заданием и фактической активной мощностью генератора. Управление подачей воздуха в компрессор

осуществляется в соответствии с расходом топливного газа и температурой выхлопных газов на выхлопе турбины.

В состав регулятора мощности газовой турбины входит частотный корректор, формирующий сигнал задания по мощности газовой турбины пропорционально отклонению частоты сети от номинального значения в соответствии с установленными значениями мертвой полосы и статизмом первичного регулирования.

Результаты испытаний

Сертификационные испытания, проведенные в декабре 2016 г., включали в себя два основных этапа:

- испытания при нанесении искусственно создаваемых возмущений
- опробование реального участка ГТУ в НПРЧ

Испытания при нанесении искусственно создаваемых возмущений разделены на 7 опытов и включают в себя: имитацию последовательных ступенчатых изменений частоты вверху и внизу регулировочного диапазона, предназначенную для проверки точности работы регулятора, имитацию скачкообразных изменений частоты, позволяющих проверить динамические возможности установки отработать возмущения за определенный промежуток времени и проверку нечувствительности первичных регуляторов в середине регулировочного диапазона [2].

Испытания проводились сотрудниками Новокуйбышевской ТЭЦ-1 при участии специалистов ОАО «ВТИ». Во время испытаний была выполнена проверка настройки системы регулирования ГТУ. Возмущения наносились с помощью автоматизированного рабочего места САУ ГТУ работниками ТЭЦ. Изменения технологических и управляющих параметров отслеживались в режиме реального времени и автоматически записывались в архив.

На рис. 1 и рис. 2 приведены примеры изменения мощности во время сертификационных испытаний. На рис. 1 показано, что при изменении частоты на $\pm 0,02$ Гц мощность изменяется на 0.5-1.1 МВт. Из графика на рис.1 следует, что нечувствительность первичных регуляторов ГТУ ст. № 1 Новокуйбышевской ТЭЦ-1 не превышает требуемые ± 10 мГц [2]. На рис. 2 показан процесс изменения мощности на $\pm 10\%$ от номинальной при изменении частоты на $\pm 0,25$ Гц. Изменение мощности энергоблока за 15 секунд составляет не менее 7,96% от номинальной мощности (требуется не менее 5%), а за 120 секунд изменение составляет 9,01% от номинальной мощности (требуется не менее 9%). Из этого следует, что параметры, характеризующие качество отработки задания по мощности ГТУ при воздействии системы первичного регулирования частоты соответствовали требованиям [2].

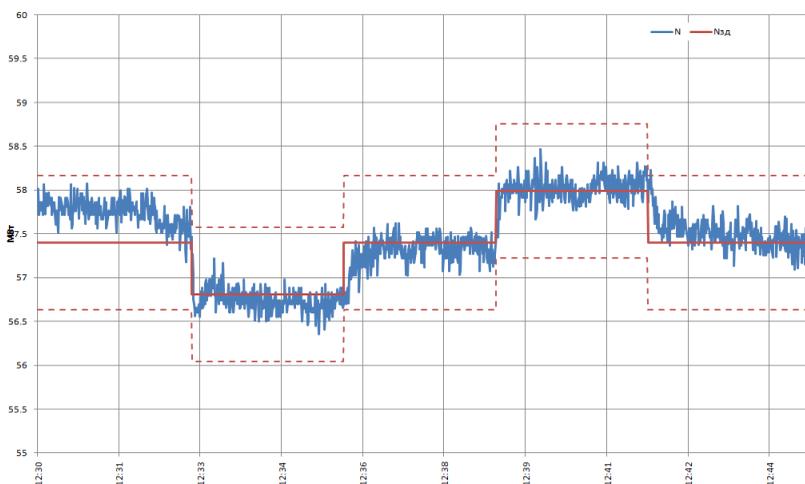


Рис.1 Изменение мощности ГТУ во время проверки нечувствительности первичных регуляторов (6 декабря 2016 г):
 N – фактическое значение мощности, Nзд – заданное значение мощности

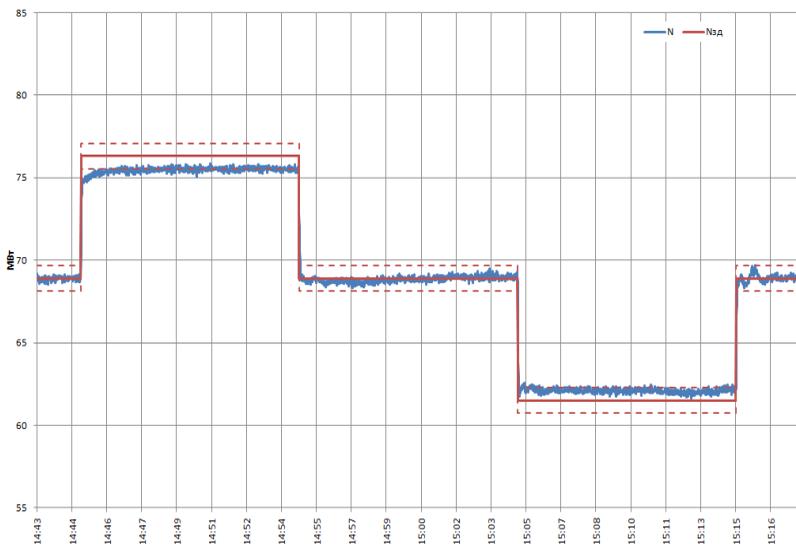


Рис. 2. Изменение мощности ГТУ при имитации отклонений частоты на ± 250 МГц вверху регулировочного диапазона (6 декабря 2016):
 N – фактическое значение мощности, Nзд – заданное значение мощности

Результаты испытаний

1. В декабре 2016 г на трех ГТУ Новокуйбышевской ТЭЦ-1 были проведены сертификационные испытания по проверке соответствия требованиям НПРЧ. Это первый опыт такого рода испытаний в России на ГТУ.

2. Результаты испытаний ГТУ Новокуйбышевской ТЭЦ-1 показали, что они соответствует всем требованиям НПРЧ [2]. Все опыты были проведены успешно, без значительных отклонений технологических параметров от требуемых значений. Проведенные испытания показали, что блок ГТУ может с большим запасом выходить на заданную нагрузку практически без перерегулирований.

Литература

1. **ГОСТ Р 54149-2010.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения
2. **Стандарт** организации АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.27.100.004-2016. Нормы участия парогазовых и газотурбинных установок в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности.
3. **Стандарт** организации АО «СО ЕЭС» СТО 59012820.27.100.001-2016. Нормы участия генерирующего оборудования тепловых электростанций с поперечными связями в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности.
4. **Стандарт** организации АО «СО ЕЭС» 59012820.27.100.002-2013. Нормы участия энергоблоков тепловых электростанций в нормированном первичном регулировании частоты и автоматическом вторичном регулировании частоты и перетоков активной мощности.

УДК 621.311.22: 681.5

А.Г. ЧАПЛИН¹, научный сотрудник,
М.Ф. ПАВЛОВА, старший научный сотрудник,
И.А. СТЕПИН, младший научный сотрудник,
А.А. НИКИФОРОВ, инженер, О.В. РАДЬКОВА, инженер

Всероссийский дважды ордена трудового красного знамени теплотехнический
научно-исследовательский институт
115280, г. Москва, ул. Автозаводская, д. 14
*E-mail: agchaplin@vti.ru*¹

Разработка технических решений по автоматизации установки очистки дымовых газов от оксидов серы на Нижнекамской ТЭЦ

Аннотация. Для установки сероочистки Нижнекамской ТЭЦ разработаны алгоритмы управления, определен объем контроля технологических параметров, выбраны типы контрольно-измерительных приборов. При этом учтены особенности технологического объекта контроля и управления, обусловленные

протеканием химических реакций, наличием потоков агрессивных сред и особых требований к точности поддержания физико-химических параметров.

Ключевые слова: очистка дымовых газов, оксиды серы, автоматическое управление, контрольно-измерительные приборы

A.G. CHAPLIN, research fellow, M.F. PAVLOVA, research fellow,
I.A. STEPIN, research fellow,
A.A. NIKIFOROV, engineer, O.V. RADKOVA, engineer

All-Russia Thermal Engineering Institute
Moscow, Russia, 115280, 14 Avtozavodskaya Str.
E-mail: agchaplin@vti.ru

Developing of automation technology for flue gas desulphurization plant at Nijnekamskaya TPP

Abstract. For flue gas desulphurization plant at Nijnekamskaya TPP control algorithms were developed, list of control parameters and types of instruments were specified. Herewith process features (presence of chemical reactions, aggressive substances, etc.) were taken into account.

Keywords: flue gas desulphurization, sulfur oxides, automatic control, instrumentation

1. Краткие сведения о технологическом объекте и выполненном проекте

Нижнекамская ТЭЦ обеспечивает электрической и тепловой энергией предприятия нефтехимической промышленности и жителей г. Нижнекамска (Татарстан). На ТЭЦ установлено 9 энергетических котлов типа ТГМЕ-464, основное топливо – природный газ. На четырёх котлах предполагается выполнение реконструкции с переводом их на сжигание нефтяного кокса в виде пыли. Для очистки дымовых газов этих котлов от оксидов серы предназначена установка сероочистки, второй функцией которой является получение продукта – минерального удобрения сульфата аммония. Это первый опыт внедрения такой технологии в российской энергетике.

Специалистами ОАО «ВТИ» выполнен т.н. «базовый проект» установки сероочистки, представляющий собой основные технические решения (технологические схемы, расчёты, предварительный выбор оборудования и др.), являющиеся исходными данными для разработки проектной документации, в соответствии с которой будут вестись строительство и монтаж.

2. Технологические процессы установки сероочистки

По сравнению с технологическим процессом производства электроэнергии и тепла на тепловой электростанции технологические процессы в установке сероочистки имеют особенность. В составе установки имеются аппараты, в которых происходят одновременно химические реакции, процессы теплообмена и фазового перехода (конденсации,

испарения), технологические потоки агрессивных сред (раствор аммиака, растворы солей аммония и т.д.), оборудование для кристаллизации жидких, сушки и транспортировки влажных и сыпучих сред.

Дымовые газы от котлов проходят через аппараты, где происходит их очистка от оксида серы, на выходе получают очищенные газы и раствор требуемого продукта – сульфата аммония. Очищенные дымовые газы направляются в дымовую трубу, а раствор продукта - через ряд аппаратов, где протекают дополнительные химические реакции, выполняется его выпаривание, кристаллизация, сушка, и, в итоге, получение готового продукта. На технологических линиях установки предусмотрена запорная и регулирующая арматура, транспортировка жидких сред выполняется с помощью насосного оборудования, сыпучих – с помощью транспортёров.

3. Работы в части автоматизации работы установки, их особенности

В части проекта автоматизации установки специалистами ОАО «ВТИ» были разработаны:

- перечни точек контроля технологических параметров с указанием рекомендуемых типов контрольно-измерительных приборов;
- перечни и алгоритмы защит, блокировок и сигнализаций;
- структурные схемы автоматических регуляторов.

Для рассматриваемой установки характерна необходимость измерения нетиповых для тепловой энергетики параметров с высокой точностью в средах с высокой агрессивностью. Например, одним из основных показателей качества технологических процессов в установке является концентрация растворов сред. Для её определения расчётным путём должно осуществляться измерение плотности сред в различных точках. Также предусмотрено измерение влажности сред (кристаллизованного и высушенного продукта).

В проекте в качестве рекомендуемых выбраны типы контрольно-измерительных приборов:

- контактные и бесконтактные (радиоизотопные) плотномеры,
- бесконтактные (радарные) уровнемеры,
- термомассовый расходомер дымовых газов для газохода большого сечения,
- рН-метры с высоким классом точности,
- датчики температуры, давления, расхода, выполненные из коррозионноустойчивых материалов.

Разработка алгоритмов автоматического регулирования для нетиповых объектов управления в ряде случаев потребовала применения схем регулирования с использованием корректирующих и опережающих сигналов. В качестве примера на рис. 1 представлена схема регулятора плотности раствора за выпарным аппаратом с коррекцией по уровню в аппарате.

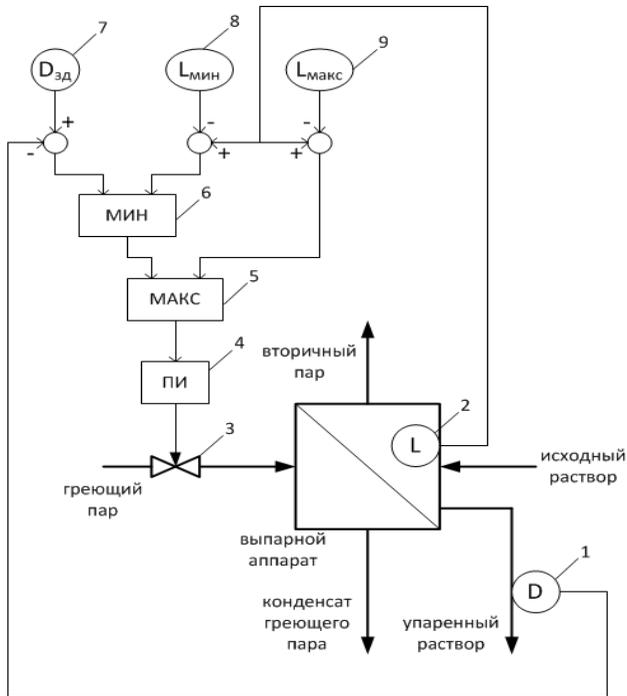


Рис. 1. Структурная схема регулятора плотности раствора за выпарным аппаратом с коррекцией по уровню в аппарате:

- 1 – датчик плотности упаренного раствора, 2 – датчик уровня в выпарном аппарате, 3 – регулирующий клапан на линии греющего пара, 4 – ПИ-регулятор, 5 – выделитель максимального сигнала, 6 – выделитель минимального сигнала, 7 – заданное значение плотности, 8 – заданное значение минимально уровня, 9 – заданное значение максимального уровня

4. Выводы

Для установки сероочистки Нижнекамской ТЭЦ, на которой внедряется впервые применяемая в российской энергетике технология, ОАО «ВТИ» разработаны алгоритмы управления, в т. ч. регулирования и защит, определен объем контроля технологических параметров, выбраны типы контрольно-измерительных приборов.

При выполнении перечисленных выше работ учитывались особенности технологического объекта контроля и управления, обусловленные наличием протекающих в аппаратах химических реакций, потоков агрессивных сред, особых требований к точности поддержания физико-химических параметров.

УДК 621.313.333

И.С. КУДРЯШОВ, гл. специалист ООО «СиСофт Иваново»,
Е.С. ЦЕЛИЩЕВ¹, д.т.н., старший науч. сотр., профессор,
А.Г. САЛИН, д.т.н., старший науч. сотр., зам. нач. отдела «САПР в энергетике»
Д.О. ЗОМАРЕВ², магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: tselishev@ivanovo.csoft.ru¹, d-zomarev@yandex.ru²

Технология автоматизированного проектирования ИИСКУЭ

Аннотация. Рассматривается технология автоматизированного проектирования систем коммерческого учета электроэнергии. Постановка задачи автоматизации построения информационной структуры проектируемой системы (модели).

Ключевые слова: система коммерческого учета электроэнергии, автоматизированное проектирование, база данных приборов, канал учета.

I.S. KUDRYASHOV, chief specialist LLC «Csoft Ivanovo»,
E.S. TSELISCHEV, doctor of engineering, senior researcher, professor,
A.G. SALIN, doctor of engineering, senior researcher,
deputy head of department «CAD in power engineering» ISPU
D.O. ZOMAREV, master student
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: tselishev@ivanovo.csoft.ru¹, d-zomarev@yandex.ru²

Technology of automated design of automated informative electric power accounting system

Abstract. The technology of computer-aided design of commercial electricity metering systems is considered. Statement of the task of automating the construction of the information structure of the projected system (model).

Key words: commercial electricity metering system, automated design, instrument database, accounting channel.

В рамках федеральной энергетической стратегии необходимость совершенствования учета потребляемых энергоресурсов представляет важную задачу, позволяя предотвратить нерациональные затраты, восполнить дефицит электроэнергии и обеспечить должный топливно-энергетический баланс на энергообъекте предприятия. С точки зрения потребителя, важна стоимость эксплуатации системы – строгий учет всех расходов ведет к снижению общей цены электроэнергии в затратах предприятия.

Как правило, процесс учета электроэнергии связан со значительной тратой усилий со стороны эксплуатирующей систему организацией. Создание АИИСКУЭ (автоматизированная информационно-измерительная система коммерческого учета электроэнергии) является той мерой, которая позволяет объединить информационное пространство, выявлять недостатки во взаиморасчетах между ресурсоснабжающими организациями и конечными потребителями их товара – энергии.

Концепция автоматизированной системы учета подразумевает проектирование АИИСКУЭ в рамках высокотехнологичного решения ряда задач: от задачи взаиморасчета за электроэнергию, до решения проблемы выявления потерь и неучетного потребления.

Разработка технических проектов на автоматизацию учета электрической энергии и мощности для промышленных предприятий невозможна без тщательной проработки вопросов выбора, размещения и установки технических средств АИИСКУЭ, устройств сбора и передачи информации, причем выполняться она должна, как правило, сотрудниками специализированных отраслевых проектных институтов.

Весь комплекс мероприятий включает два этапа:

- подготовительные работы и сбор информации по электроснабжению;
- разработка проектных решений и оформление технической документации.

На первом этапе проводятся обследование и изучение существующей схемы учета и системы расчетов за потребленную электроэнергию. При этом уточняются, анализируются и включаются в отчет следующие документы:

- перечень субабонентов, рассчитывающихся с основным абонентом;
- перечень счетчиков электрической энергии (активной и реактивной), по которым ведутся расчеты с основным абонентом, его субабонентами и потребителями других тарифных групп, с указанием параметров учета (коэффициенты трансформаторов тока и напряжения, число импульсов и т.д.);
- схема размещения всех вышеперечисленных счетчиков активной и реактивной энергии на принципиальной электрической схеме электроснабжения;
- акты разграничения балансовой принадлежности электрических сетей и трансформаторов.

По результатам обследования решаются принципиальные вопросы создания АИИСКУЭ, в том числе следующие:

- на базе какой системы учета будет выполнена АИИСКУЭ;
- место установки вычислительного комплекса АИИСКУЭ;
- способ обеспечения связи счетчиков с устройствами сбора данных (УСД) с вычислительным комплексом АИИСКУЭ;
- способ передачи информации на пункт сбора отдела сбыта энергии;
- источники питания, обеспечения автоматического включения резерва и другие вопросы.

На рис. 1. представлена структура взаимодействия проектной организации со службами заказчика, информационные потоки при разработке АИИСКУЭ.

Анализ существующей технологии проектирования выявил некоторые ее недостатки:

- неопределенность исходных данных;
- методологические и организационные ограничения;
- отсутствие единой информационной основы проекта;
- множество промежуточных информационных потоков;
- слабая управляемость процессом проектирования.

Большинство существующих в настоящее время программ и программно-информационных комплексов, призванных автоматизировать процесс проектирования рассматриваемого класса систем, к сожалению, не снимают остроту проблем, связанных с перечисленными недостатками. Он зачастую автоматизируют лишь отдельные процедуры, действия и операции. Но не позволяют добиться сквозной автоматизации, а только механизмируют проектирование. Для

них требуется ввод исходных данных в больших объемах, которые зачастую несогласованны между собой.

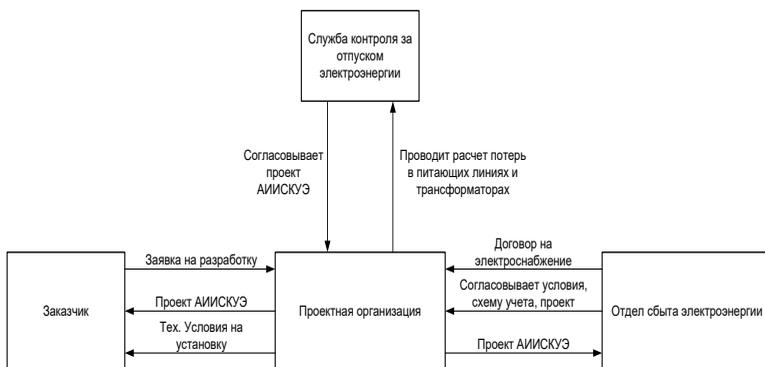


Рис. 1. Структура взаимодействия

Становится актуальной задача автоматизации построения информационной структуры проектируемой системы (модели), которая впоследствии является источником данных для выпуска проектной документации. Решением является применение агрегативно-декомпозиционной технологии (АД-технологии). Отличительная особенность АД-технологии заключается в информационной интеграции описаний проектируемой системы на всех этапах ее технического синтеза на основе понятия единой модели проекта. Единая модель проекта отражает процесс «эволюции» проекта от начального технического задания до полной параметрической модели [1, 2].

Зачастую, на момент начала производства проекта заказчик работ не может предоставить исходные данные для проектирования в объеме, достаточном для обеспечения выполнения проекта имеющимися ресурсами, традиционными средствами и в необходимые сроки. Для обеспечения заданных сроков сдачи проектной документации нужно рационально распределить необходимые трудовые ресурсы на все время выполнения договора. Это осуществляется путем разделения работ на два вида: подготовительные и основные.

В рамках автоматизированной технологии подготовительные работы занимают значительную часть времени и включают следующие процедуры: настройку средств проектирования, отладку автоматизированных проектных процедур и операций, тестирование на предварительных проектных данных. Непосредственно основной, конечный проект формируется максимально быстро по мере поступления/накопления достаточного объема исходных данных ближе к сроку завершения работ. Такую динамику в большом проекте может обеспечить только применение автоматизированного проектирования. Кроме того, очевидно, что исходные данные, которые были получены на момент начала проектных работ, будут неизбежно скорректированы в достаточно больших объемах. Например, по мере выполнения проекта, несколько раз по требованию заказчика может быть выполнена

замена моделей используемых кабелей. Это не должно привести к значительным трудозатратам, т.к. применяемые программные средства должны обеспечивать как быстрый поиск нужных элементов в проекте, так и внесение необходимых групповых изменений, в том числе с их автоматическим внесением в уже сформированные проектные документы.

При настройке информационного обеспечения большое внимание должно уделяться максимальной автоматизации процедур применения. Под ними подразумеваются комплексные проектные процедуры, которые бы обеспечивали выполнение типовых цепочек проектных действий нажатием одной кнопки. Участие специалиста в процессе проектирования тогда сводится к функции «оператора», а не непосредственного исполнителя. Такое решение позволяет снизить трудозатраты специалиста, эксплуатирующего САПР при выполнении проекта и значительно упрощает интерфейс.

Описываемая в настоящей статье технология исследуется в рамках работ АО «Зарубежэнергопроект» при проектировании ряда энергетических объектов. Результаты анализа исследований показали, что технология позволяет:

- повысить качество проектной документации;
- сократить сроки проектирования;
- снизить количество ошибок в выполняемых проектах;
- многократно использовать данные уже реализованных проектов (автоматизированное тиражирование проектных решений).

Степень автоматизации при проектировании по некоторым экспертным оценкам возрастает до 80-85%, а производительность труда в 2-4 раза в зависимости от уровня типизации систем.

Литература

1. **Целищев Е.С.** и др. Технология проектирования тепловых электростанций и методы ее компьютеризации. М. Энергоатомиздат. 1997.
2. **Целищев Е.С., Глянцева А.В.** Методы достижения максимальной эффективности применения САПР при разработке проектов АСУТП // Автоматизация в промышленности.- 2013.- № 9.

УДК 681.51

А.Г. КУЗНЕЦОВ¹, магистрант,
А.Н. НИКОПОРОВ², к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: kuznetsovlexa2015@yandex.ru¹, anick037@mail.ru²

Полигонная АСУТП турбинного оборудования мощного энергоблока ТЭС

Аннотация. Целью работы является создание полигонной версии АСУТП турбинным оборудованием энергоблока 1200 МВт Костромской ГРЭС, которая реализуется средствами промышленного ПТК и управляет объектом, представленным его имитационной моделью.

Ключевые слова: автоматизированная система управления; программно-технический комплекс; имитационная модель.

A.G. KUZNETSOV undergraduate student,
A.N. NIKONOROV Candidate of Engineering, docent,
Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kuznetsovlexa2015@yandex.ru¹, anick037@mail.ru²

The educational and research version of the process control system of turbine equipment of powerful power unit of TPP

Abstract. The aim is a creating the educational and research version of the process control system of turbine equipment of power unit 1200 MW of Kostroma's State District Power Plant which is realized by industrial software and hardware complex and control the simulation model of the object.

Key words: process control system; software and hardware complex; simulation model.

Актуальной задачей современной энергетики является повышение надежности, экономичности и маневренности оборудования. Для решения данной задачи необходимо проведение экспериментальных исследований. Испытания на реальном оборудовании весьма сложны и трудоемки, а также опасны, т.к. нарушают нормальные режимы работы оборудования, поэтому актуальным и целесообразным является использование специализированных программно-технических средств – полигонных АСУТП.

Полигонная АСУТП – это система, которая отличается от своего аналога на станции меньшим информационным масштабом и ограничениям по режимам работы. Многоцелевые полигоны как тренажерные комплексы строятся на основе базового ПТК АСУТП, но в роли основного оборудования выступают модели объекта управления. Главным преимуществом многоцелевых тренажеров на базе учебно-исследовательских АСУТП является приближенная к реальной работа оператора блока в структуре АСУТП [1, 2].

Техническая структура полигонной АСУТП содержит группу рабочих станций оперативного персонала, группу рабочих станций неоперативного персонала, группу ЭВМ модели объекта управления, группу рабочих станций проектирования, группу рабочих станций инструктора, группу физических контроллеров, группу виртуальных контроллеров, группу исполнительных устройств, группу адаптеров связи, группу ЭВМ связи и сетевых коммутаторов [1].

Были разработаны модели объектов управления турбины и совмещенного с ней оборудования – системы смазки подшипников паровой турбины и системы уплотнений паровой турбины.

Основой модели паровой турбины служит система уравнений математического представления процесса расширения рабочего тела в проточной части турбины, в которую входят следующие уравнения:

- расхода пара через турбинные отсеки,

- энтальпии пара за блоком ступеней,
- расхода пара из камеры отбора в подогреватель,
- материального баланса,
- теплового потока от пара к металлу турбины,
- сохранения энергии.

Для имитации работы подсистемы смазки подшипников разработана модель маслоохладителей турбины как элементарных теплообменников. Математическая модель маслоохладителей турбины построена на основе законов сохранения вещества и энергии, записанных для взаимодействующих при теплообмене компонентов: масла, охлаждающей воды и металла труб теплообменника [2].

Для системы уплотнений разработана модель секции лабиринтовых уплотнений, в которую входят уравнения [3]:

- зависимости давления пара на выходе из лабиринтовых уплотнений в зависимости от входного давления,
- закона сохранения массы для уплотняющего пара.

Подсистема управления включает в себя регулятор мощности, регулятор температуры масла на смазку подшипников турбины, а также регуляторы давления пара на уплотнения турбины и отсоса пара с уплотнений турбины.

Нижний уровень АСУТП реализуется через исполнительные механизмы стенда типовых электрических устройств. Стенд предназначен для демонстрации дистанционного и автоматического управления типовыми электрическими исполнительными устройствами. Физические контроллеры, которые образуют верхний уровень АСУТП, необходимы для обеспечения связи между подсистемой управления и исполнительными механизмами.

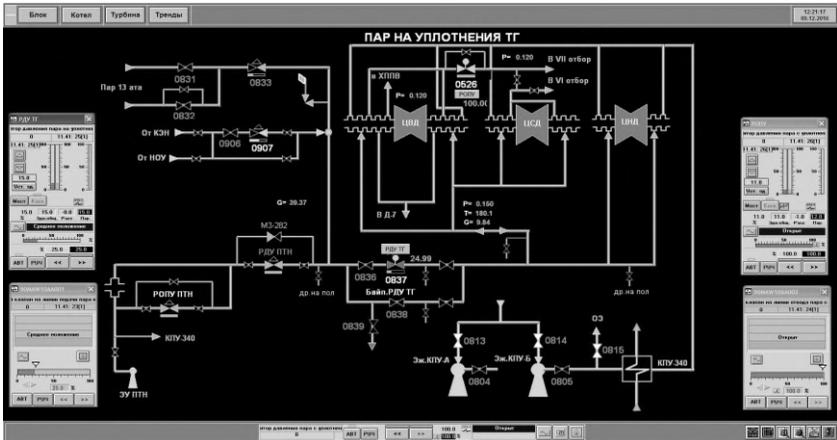


Рис. 1. Мнемосхема системы уплотнений полигонной АСУТП

Для реализации операторского интерфейса были разработаны мнемосхемы для полигонной АСУТП с целью отображения технологического процесса оператору. Пример мнемосхемы полигонной АСУТП представлен на рис. 1.

Разработанная полигонная АСУТП позволяет проводить экспериментальные исследования для совершенствования функций систем автоматизированного управления, отработки новых технологических решений в аспекте схем регулирования, обучения специалистов в области автоматизации технологических процессов, а также использоваться студентами при выполнении курсового и дипломного проектирования.

Литература

1. **Тверской Ю.С.**, Никоноров А.Н., Пронин Д.А. Прикладное обеспечение полигонов АСУТП электростанций; под ред. Ю.С. Тверского / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 174 с.
2. **Теория** и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций.. Кн. 3. Моделирование / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 176 с.
3. **Яблоков Л. Д.** Конструкция и тепловой расчёт концевых уплотнений паровых турбин: Учеб. пособие / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – Иваново, 2014. – 92 с.

УДК 621.926

М.А. ИВАНКОВА¹, магистрант,
Ю.С. ТВЕРСКОЙ², д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: Rita_2501@mail.ru¹, Tverskoy@su.ispu.ru²

Всережимная нелинейная математическая модель шаровой барабанной мельницы в структуре пылесистемы с промежуточным бункером угольной пыли

Аннотация: разработана нелинейная математическая модель пылесистемы, которая отражает выходные параметры на участках процесса пылеприготовления и их влияние на эффективность работы всей структуры.

Ключевые слова: шаровая барабанная мельница, пылесистема, обобщенный термодинамический анализ, законы сохранения неравновесной термодинамики, математическая модель, имитационная модель.

M.A. IVANKOVA Master student,
 U.S. TVERSKOY Doctor of Engineering, professor
 Ivanovo State Power Engineering University
 153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
 E-mail: Rita_2501@mail.ru¹, Tverskoy@su.ispu.ru²

All-range nonlinear mathematical model for ball tube mill in the structure of a dust-system with an intermediate coal dust bunker

Abstract. A developed nonlinear mathematical model of a dust-system, which reflects the output parameters on the sections of the dust preparation process and their effect on the efficiency of the entire structure.

Key words: for ball tube mill, dust-system, generalized thermodynamic analysis, laws of conservation of nonequilibrium thermodynamics, mathematical model, imitation model.

Пылесистема с промежуточным бункером угольной пыли на базе ШБМ представляет собой сложный многосвязный объект с большим числом выходных параметров (требований), внешних возмущений (неконтролируемых) и ограниченным числом управляющих воздействий (рис. 1).

Входными параметрами являются расход сырого топлива и расход сушильного агента. Выходные параметры: расход готовой пыли, температура аэросмеси за сепаратором и внутренняя температура системы – загрузка мельницы топливом и шаровая загрузка. Внешними неконтролируемыми возмущениями являются характеристики сырого топлива (влажность, зольность и др.), внешним корректирующим управлением является угол поворота регулирующих лопаток сепаратора.

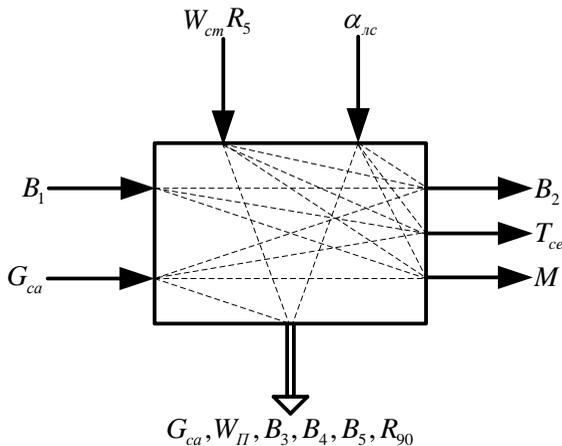


Рис. 1. Структурная схема объекта управления

В основу математической модели положены законы сохранения неравновесной термодинамики и результаты обобщенного термодинамического анализа эффективности ШБМ и пылесистемы.

В структуре математической модели выделены основные технологические участки: сушка топлива, размол, сепарация полидисперсного потока, выделение готового топлива и возврата на домол (рис. 2).

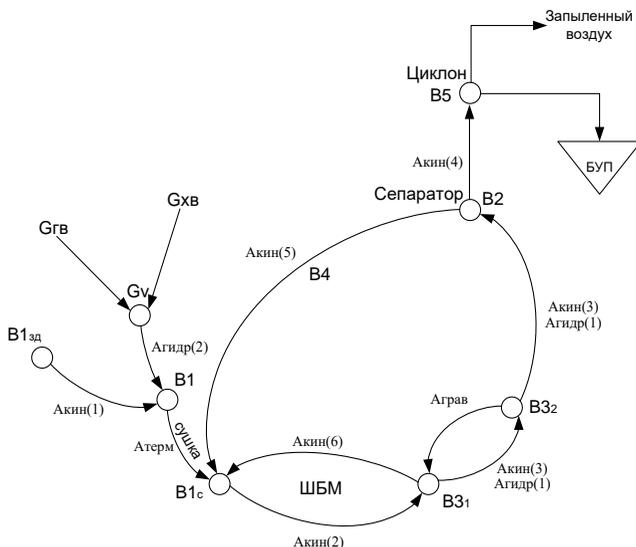


Рис. 2. Граф обобщенных термодинамических работ в системе «мельница-сепаратор» в пылесистеме с промежуточным бункером угольной пыли: $V1_{зд}$ – расход сырого топлива на входе в мельницу; $V1_c$ – расход сухого угля на входе в мельницу; $V2$ – расход готовой пыли на выходе из мельницы; $V3_1$ – расход мельничного продукта; $V3_2$ – расход мельничного продукта после первой ступени сепарации; $V4$ – возврат пыли на домол; $V5$ – расход готовой пыли в бункер пыли; G_v – расход сушильно-вентилирующего агента; $G_{гв}$ – расход горячего воздуха; $G_{хв}$ – расход холодного воздуха; БУП – бункер угольной пыли

Разработана схема имитационной модели, реализованная путем решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений средствами ПМК Vissim.

Математическая модель дополнительно включает в себя уточнения по определению кратности циркуляции топлива в системе мельница – сепаратор, коэффициента, учитывающего долю циркуляции топлива. Показано также, что нагрузочный коэффициент, который в нормативном методе решается только относительно массы загружаемых шаров, должен учитывать массу топлива, циркулирующего в системе мельница – сепаратор.

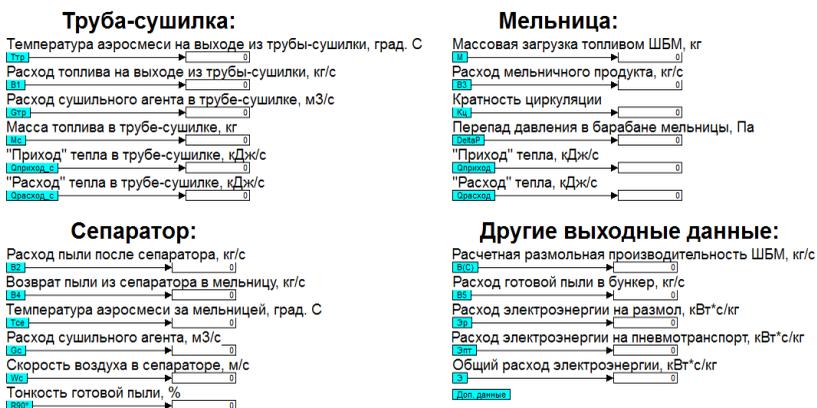


Рис. 3. Выходные параметры имитационной модели

В докладе приводятся результаты исследований влияния качества топлива, конструктивных характеристик мельницы, расхода топлива и сушильного агента на эффективность процесса пылеприготовления.

Литература

1. Тверской Ю.С. Локальные системы управления. Учебно-методическое пособие. Иваново: ИГЭУ, 2011. – 128 с.
2. Хзмалян Д. М., Каган Я. А. Теория горения и топочные устройства/ Под ред. Д. М. Хзмаляна. Учеб.пособие для студентов высш. учеб. заведений. М., «Энергия», 1976. 488 с. с ил.
3. Теория и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн. 3. Моделирование/ Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С.Тверского; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина». – Иваново, 2013. – 176 с.

УДК 681.513.62

Я.В.ЛИСОВА¹, магистрант,
Ю.С. ТВЕРСКОЙ², д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: my_dream1993@mail.ru¹, tverskkoy@mail.ru²

Разработка нелинейной математической модели первого контура энергоблока АЭС с ВВЭР-1000

Аннотация. Разработана нелинейная математическая модель первого контура энергоблока АЭС с ВВЭР-1000, которая отличается инвариантной и варь-

руемой частью, что обеспечивает удобство конфигурирования и корректировки модели под параметры аналогичных энергоблоков АЭС типа ВВЭР.

Ключевые слова: атомная электростанция, ВВЭР, математическая модель, обобщенный термодинамический анализ, первый контур

Y.V. LISOVA, student,
Y.S. TVERSKOY, doctor of engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: my_dream1993@mail.ru, tverskkoj@mail.ru

Development of nonlinear mathematical model of the first circuit of the power unit of the NPP with VVER-1200

Abstract. A nonlinear mathematical model of the first nuclear power plant circuit with VVER-1000, which is different invariant and variable part, to allow for easy configuration and adjustment parameters of the model under different VVER-type nuclear power plants.

Key words: nuclear power plant, VVER, mathematical model, generalized thermodynamic analysis, nuclear plant primary system.

Современная технология создания многофункциональных АСУТП электростанций для повышения уровня проектных решений требует оценивать управляемость технологического оборудования и эффективность систем управления на ранних стадиях разработки проекта энергоблока методами математического моделирования. В основе теории построения высокоточных математических моделей технологических процессов и установок лежат фундаментальные законы неравновесной термодинамики (феноменологический подход), позволяющие получать распределенные трехмерные детерминированные всережимные динамические модели. Задача разработки нелинейной математической модели первого контура энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 является достаточно актуальной, так как существующие полномасштабные тренажеры энергоблоков созданы под готовый проект, и на ранних стадиях разработки проекта не могут быть сконфигурированы для проведения определенных испытаний [1-4].

В докладе приводится полное описание разработанной математической модели, включающей в себя уравнения для реакторной установки (ВВЭР-1000), парогенератора (ПГВ-1000М) и главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ).

Объем математической модели определяется результатами обобщенного термодинамического анализа эффективности первого контура и требованиями к реализации и исследованию АСП питания парогенератора (рис. 1).

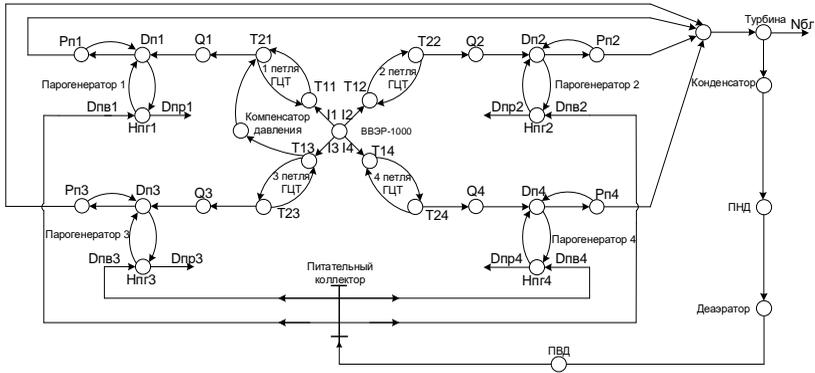


Рис.1. Обобщенный потоковый граф первого контура энергоблока АЭС:
 I – плотность нейтронного потока, нейтр/м²с; T_1 – температура теплоносителя в горячей нитке ЦК, °С; T_2 – температура теплоносителя в холодной нитке ЦК, °С;
 Q – количество теплоты, ДЖ; D_n – расход пара, кг/с; P_n – давление пара, МПа;
 $D_{пв}$ – расход питательной воды, кг/с; $D_{пр}$ – расход воды на продувку, кг/с;
 $H_{пг}$ – уровень в парогенераторе, м.

На основе разработанной математической модели первого контура энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 реализована имитационная модель. В качестве исходных данных использованы конструктивные и режимные параметры реального оборудования [5].

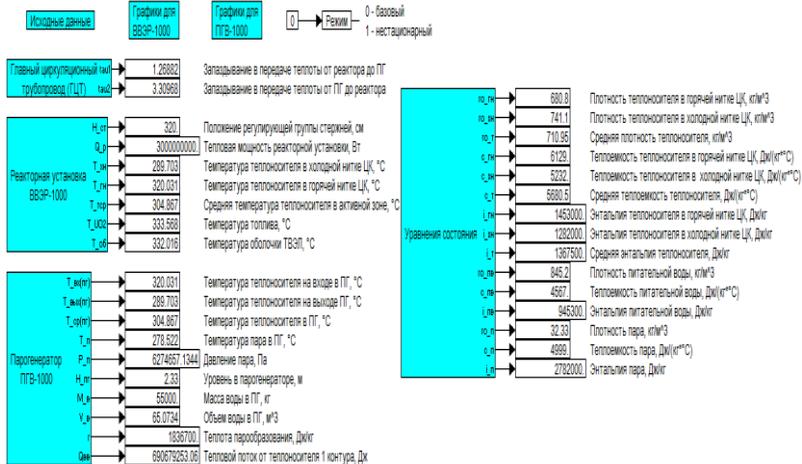


Рис. 2. Структура имитационной модели в ПМК VisSim

Реализация модели в системе VisSim (рис.2.), включает в себя:

- блок исходных данных;
- выбор режима для расчета модели (базовый или нестационарный);
- блоки, включающие в себя графики по основным параметрам реакторной установки и парогенератора;
- модель реакторной установки, парогенератора, а также главного циркуляционного трубопровода;
- блок расчета уравнений состояния.

Для решения системы нелинейных дифференциальных уравнений выбран метод Рунге-Кутты второго порядка. Шаг интегрирования равен 0,01.

Результаты разработки математической и имитационной модели первого контура энергоблока АЭС могут быть использованы для создания полной математической модели энергоблока АЭС и решения задач функционального проектирования АСУТП, в том числе синтеза новых структур локальных систем автоматического управления питания парогенератора энергоблока АЭС с ВВЭР-1000.

Литература

1. **Теория** и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн. 2. Проектирование / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 436 с.
2. **Демченко В.А.** Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. – Одесса: Астропринт, 2001. – 308 с.
3. **Лаврентичев Д.В., Тверской Ю.С.** Технология разработки и оценка меры адекватности всережимной динамической математической модели первого контура энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 // Автоматизация в промышленности. – 2015. – № 11. – С. 30–33.
4. **Аксенов В.Р., Батраков С.В., Василенко В.А.** Автоматизированные системы управления технологическими процессами атомных электростанций. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – 310 с.
5. **Баклушин Р.П.** Эксплуатационные режимы АЭС. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. дом МЭИ, 2012. – 532 с.

УДК 620.92

Е.Д. КОЗЛОВА¹, магистрант,
А.Н. НИКОНОРОВ², к.т.н., доцент
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: princess9-94@mail.ru¹, anick037@mail.ru²

Моделирование ветроэнергетической установки

Аннотация: разработана математическая модель поведения ветроэнергетической установки (ВЭУ), основанная на законах механики и электродинамики, а также техническом описании агрегата; по полученным закономерностям была составлена имитационная модель установки, позволяющая наглядно изучить поведение ВЭУ.

Ключевые слова: математическое моделирование, имитационное моделирование, ветроэнергетическая установка.

E.D. KOZLOVA master student,
A.N. NIKONOROV Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: princess9-94@mail.ru¹, anick037@mail.ru²

Modeling of a wind power plant

Abstract. A mathematical model the behavior of a wind power plant has been developed, based on the laws of mechanics and electrodynamics and on the technical description of the aggregate; according to the obtained regularities, an imitation model of the installation has been constructed, which allows to visually examine the behavior of wind turbines.

Keywords: mathematical modeling, simulation modeling, wind power plant.

Перспективным вариантом развития структуры электроэнергетического комплекса РФ является строительство ветроэлектростанций (ВЭС), которые могут работать в достаточно широком диапазоне рабочих параметров, определяемых условиями среды, а также отличаются автономностью работы, что резко сокращает вероятность возникновения отказов оборудования и аварийных ситуаций, вызванных некорректными действиями обслуживающего персонала [1].

Одним из важнейших аспектов разработки проектов строительства, внедрения и усовершенствования энергетических установок является математическое и имитационное моделирование поведения агрегатов, адекватно отражающее их основные исследуемые характеристики [2].

В основе современной теории построения высокоточных всережимных математических моделей технологических объектов управления лежат фундаментальные законы неравновесной термодинамики, позволяющие получать обобщенные распределенные трехмерные нелинейные (всережимные) детерминированные динамические модели и,

совмещая их с уравнениями состояния, строить высокоточные математические модели конкретного тепломеханического оборудования.

Используя техническое описание ветроэнергетической установки (ВЭУ), законы механики и электротехники, была разработана математическая модель, описывающая поведение ВЭУ, а затем на основе полученных уравнений реализована ее имитационная модель.

В процессе моделирования поведения ВЭУ был выдвинут ряд основных требований, которым должна удовлетворять конечная математическая модель агрегата: адекватность реальному объекту; быстродействие; надежность; универсальность; модульная структура построения модели; иерархическое построение математической модели; максимальное использование стандартных математических методов.

Ветроэнергетическая установка как объект управления для удобства и наглядности изучения протекающих в ней физических процессов может быть условно разделена на три основные части: ветроколесо, мультипликатор, генератор (рис.1) [3].

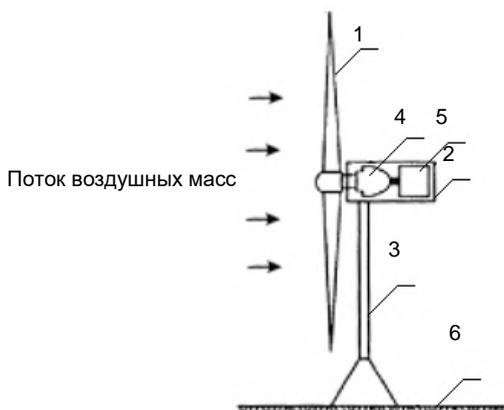


Рис.1. Принципиальная схема ветроэнергетической установки:
1- ветроколесо; 2 – гондола; 3 – башня; 4 – мультипликатор; 5 – генератор;
6 – нулевая отметка.

Ветроколесо используется для преобразования кинетической энергии ветра в механическую работу. Мультипликатор обеспечивает передачу механического крутящего момента от турбины к генератору. Асинхронный генератор осуществляет превращение механической энергии вращения вала генератора в конечный продукт – электрическую энергию.

В качестве исходных данных для моделирования ветроэнергетической установки заданы три типа параметров: параметры среды (темпе-

ратура воздуха – T , °C; давление воздуха – p , Па; скорость ветра – u , м/с; направление ветра – α , °), постоянные коэффициенты (универсальная газовая постоянная – R , Дж/(моль·K); коэффициент крутящего момента – c_m ; молярная масса воздуха – M , кг/моль), конструктивные параметры (ометаемая площадь – S , м²; расстояние от центра ветроколеса до центра масс лопасти – b , м; отношение числа зубьев вала генератора к числу зубьев вала ветроколеса – N_g/N_e ; момент инерции ветроколеса – J_e , кг·м²; момент инерции генератора – J_g , кг·м²).

Имитационная модель ветроэнергетической установки реализована средствами программного комплекса «VisSim» и состоит из ряда макроблоков. Общий вид модели представлен на рис. 2. Характеристики датчиков и исполнительных механизмов ВЭУ были отражены в структуре сигналов путем ввода аperiodических звеньев и звеньев запаздывания.

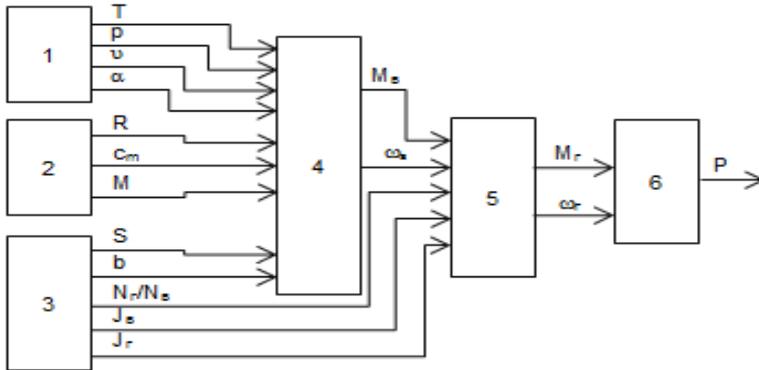


Рис. 2. Общий вид имитационной модели, описывающей поведение ВЭУ:
 1 – блок «Параметры среды»; 2 – блок «Постоянные коэффициенты»;
 3 – блок «Конструктивы»; 4 – блок «Ветроустановка»;
 5 – блок «Мультипликатор»; 6 – блок «Генератор»

Блоки «Параметры среды», «Постоянные коэффициенты» и «Конструктивы» определяют исходные данные для исследования работы установки. Блоки «Ветроустановка», «Мультипликатор» и «Генератор» описывают динамику процессов, протекающих в соответствующих элементах.

Разработанная модель ветроэнергетической установки может представлять интерес для дальнейшего использования на начальной стадии проектирования ветропарков, так как появляется возможность более детального и точного исследования характеристик работы отдельных агрегатов в заданных условиях местности.

Литература

1. **Manwell, J. F.** Wind energy explained: theory, design, and application / James Manwell, Jon McGowan, Anthony Rogers. – 2nd ed. – Chippenham: John Wiley & Sons Ltd, 2009. – 688 с.
2. **Теория** и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского; Кн. 3. Моделирование. – ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 208 с.
3. **Козлова Е.Д., Никоноров А.Н.** Разработка информационной модели ветроустановки // Сборник науч. трудов по материалам IV межд. науч.-практ. конф. «Актуальные вопросы научных исследований». Иваново: ИП Цветков А.А., 2016. – С. 25-30.

УДК 681.51

Р.А. ВИЛЕСОВ¹, магистрант, А.Г. КУЗНЕЦОВ², магистрант,
А.Н.НИКОНОРОВ³, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфakovская 34
*E-mail: gloomy.hunter.V-R-A@yandex.ru¹, kuznetsovlexa2015@yandex.ru², an-
ick037@mail.ru³*

Разработка алгоритма оптимизации нейросетевого регулятора

Аннотация. Целью работы является разработка алгоритма, ускоряющего обучение нейросетевого регулятора, а также повышающего качество регулирования по сравнению с традиционными регуляторами путем дихотомии пространства параметров в условиях ступенчатых возмущений.

Ключевые слова: нейросетевой регулятор, методы оптимизации, автоматическая система регулирования.

R.A. VILESOV, undergraduate student,
A.G. KUZNETSOV, undergraduate student,
A.N. NIKONOROV, Candidate of Engineering, docent,

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
*E-mail: gloomy.hunter.V-R-A@yandex.ru¹, kuznetsovlexa2015@yandex.ru²,
anick037@mail.ru³*

Development of an optimization algorithm of neural network controller

Abstract. The aim is a development of an algorithm that accelerates the training of neural network controller, as well as improving the quality of regulation than traditional regulators by the dichotomy of parameter space in terms of step and random disturbances.

Key words: neural network controller; optimization methods; process control system.

В процессе проектирования систем управления возникает оптимизационная задача, которая решается путем структурного и параметрического синтеза [1]. Целью работы является реализация и исследование алгоритма автоматической настройки нейронного регулятора, обеспечивающей максимум эффективности регулирования.

Общая структура регулятора, построенного на основе теории нейроалгоритмов, приведена на рис.1. На вход регулятора поступает сигнал по ошибке управления, а также сигналы по ошибке управления, задержанные на один и два такта соответственно.

Задача оптимизации формулируется следующим образом – необходимо найти максимум функции эффективности в зависимости от аргументов: начального значения синоптических коэффициентов внутреннего и выходного слоев W_0 и V_0 [2], параметра нормирования SD-Scale [3], а также скорости и шага обучения нейросети n и dt .

$$Eff(W_0, V_0, SD, n, dt) \rightarrow \max$$

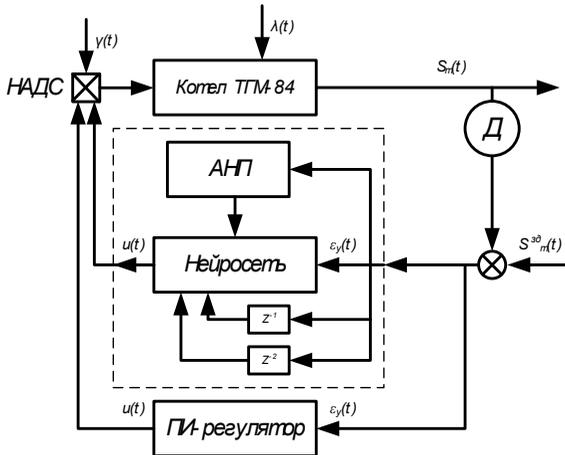


Рис. 1. Структурная схема нейросетового регулятора на примере регулятора разрежения:

НАДС – направляющий аппарат дымососа, АНП – алгоритм настройки параметров нейрорегулятора, Д – датчик, Z – задержка

Задание начальных коэффициентов в нейрорегуляторах зачастую происходит необоснованно, так как математически невозможно рассчитать оптимальные значения. Из анализа зависимостей пространства параметров нейросети на скорость и качество обучения, можно прийти к выводу, что экстремум один и колеблется в окрестности некоторой точки, которая зависит непосредственно от объекта [4].

Начальные коэффициенты являются аргументами функции эффективности и составляют 5-мерное факторное пространство. Таким

образом, задача сводится к поиску экстремума методом, работающим на недифференцируемом многомерном пространстве, схожим с методом полнофакторного эксперимента.

Рассматриваемый метод реализован в алгоритме пошаговой оптимизации с последовательным приближением коэффициентов к оптимальным. В каждом шаге алгоритм проводит n^{m-1} экспериментов и определяет направление изменения значения коэффициентов (n – число возможных вариантов изменений параметра; в рассматриваемом случае их три: значение либо не изменяется, либо уменьшается, либо увеличивается; m – размерность пространства). На каждом сечении пространства оптимальное значение определяется методом половинного деления пространства аргументов функции эффективности. Графическое представление метода половинного деления (дихотомии) для функции одной переменной представлено на рис. 2.

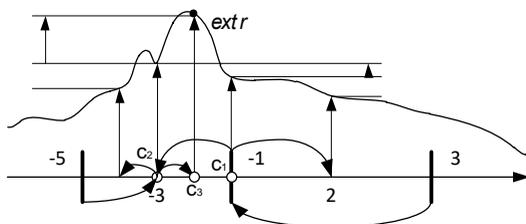


Рис. 2. Графическое представление метода дихотомии:
 C_i – i шаг работы алгоритма, *extr* – экстремальное значение функции

На рис. 3–6 представлены графики сравнения систем регулирования на базе традиционного и нейросетевого регулятора после работы алгоритма оптимизации.

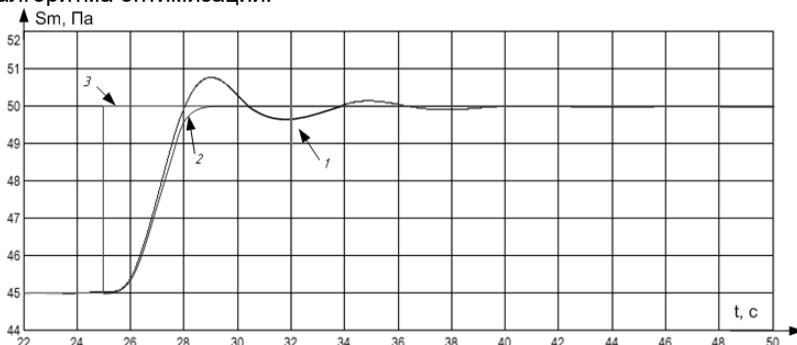


Рис. 3. Переходные процессы в АСР при возмущении заданием:
 1 – АСР с традиционным ПИ-регулятором, 2 – АСР с регулятором на базе нейросети, настроенной при помощи алгоритма половинного деления,
 3 – сигнал задания

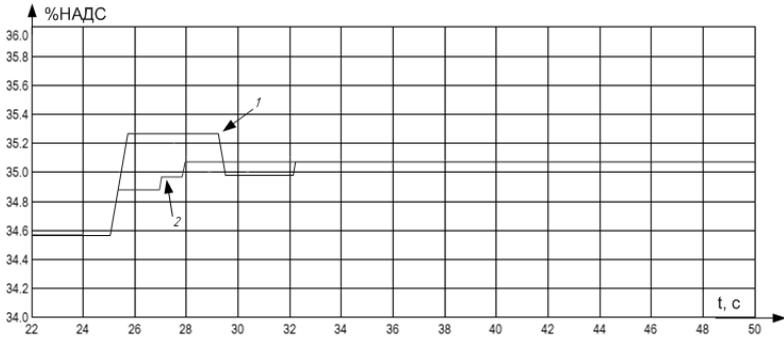


Рис. 4. Перемещение НАДС при возмущении заданием:
 1 – АСР с традиционным ПИ-регулятором, 2 – АСР с регулятором на базе нейросети, настроенной при помощи алгоритма половинного деления

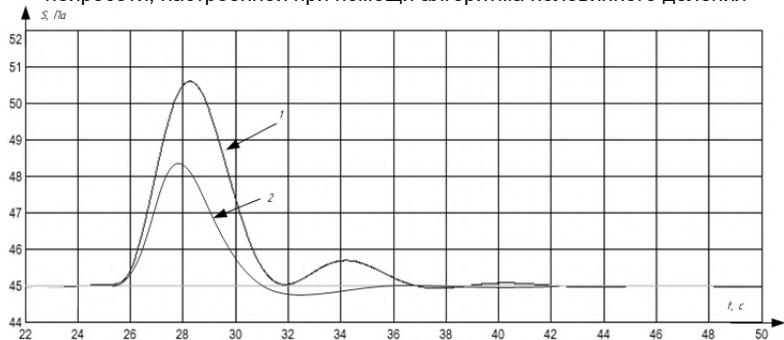


Рис. 5. Переходные процессы в АСР при внутреннем возмущении:
 1 – АСР с традиционным ПИ-регулятором, 2 – АСР с регулятором на базе нейросети, настроенной при помощи алгоритма половинного деления

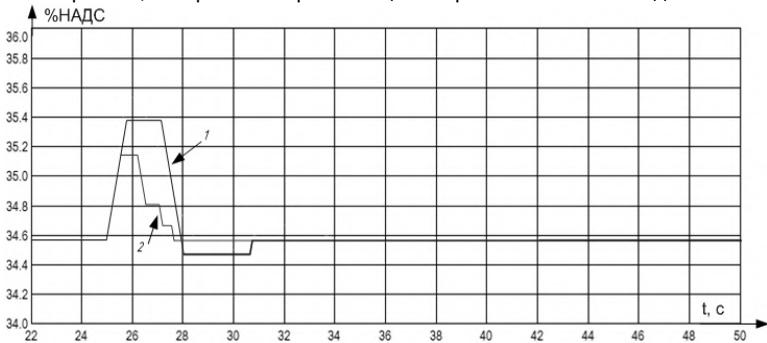


Рис. 6. Перемещение НАДС при внутреннем возмущении:
 1 – АСР с традиционным ПИ-регулятором, 2 – АСР с регулятором на базе нейросети, настроенной при помощи алгоритма половинного деления.

Как видно из графика, использование алгоритма повышает качество поддержания разрежения в топочном пространстве по сравнению с традиционными регуляторами.

Литература

1. **Теория** и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций.. Кн. 3. Моделирование / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 176 с.
2. **Комашинский В.И.**, Смирнов Д.А. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи. – М: Горячая линия-Телеком, 2003. – 94 с.
3. **Бодянский Е.В.**, Руденко О.Г. Искусственные нейронные сети: архитектуры, обучение, применения. – Харьков: ТЕЛТЕХ, 2004. – 369 с.
4. **Круглов В.В.**, Борисов В.В. Гибридные нейронные сети.– Смоленск: Русич, 2001. – 224 с.

УДК 621.18-5

С.Д. СМЕКАЛОВ¹, магистрант, А.В. ГОЛУБЕВ², к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: kafsu@su.ispu.ru^{1,2}

Исследование системы автоматического регулирования температуры пара прямоточного котла

Аннотация: разработана система автоматического регулирования температуры пара прямоточного котла, учитывающая положение клапана одного из впрысков.

Ключевые слова: система автоматического регулирования, прямоточный котел, регулирование температуры пара, впрыскивающие пароохладители.

S.D. SMEKALOV, master student,
A.V. GOLUBEV, Candidate of Engineering, docent
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kafsu@su.ispu.ru^{1,2}

Investigation of the automatic control system of the steam temperature of a direct boiler

Abstract. The system of automatic regulation of the steam temperature of the ramjet boiler is developed, taking into account the position of the valve of one of the injections.

Key words: automatic control system, single-flow boiler, steam temperature control, injection desuperheaters.

Температура перегретого пара является важнейшим параметром, определяющим надежность работы котла и турбины и экономичность энергоблока в целом. Поэтому допускаются лишь небольшие отклонения от номинального значения.

Для повышения точности регулирования температуры пара в АСР дополнительно с основной регулируемой величиной используются сигналы по опережающим регулируемым величинам, обладающим более благоприятными динамическими свойствами при возмущении регулирующим органом АСР.

Непосредственное регулирование температуры перегретого пара осуществляется с использованием впрысков, установленных перед каждым пакетом пароперегревателя. Первый впрыск поддерживает температуру за ширмовым пароперегревателем и задает диапазон регулирования для второго впрыска. Второй впрыск служит для поддержания температуры на выходе из котла. Значение температуры перед первым впрыском изменяется в соответствии с работой регулятора соотношения, который поддерживает постоянное отношение между величиной тепловыделения в топке и расходом питательной воды. При изменении температуры перед первым впрыском, регулятор соотношения изменяет соответствующим образом расход питательной воды. Степень изменения расхода воды на впрыск будет тем меньшей, чем точнее скорректировано соотношение «топливо — вода» основным регулированием. Таким образом, стоит рассматривать систему, как многосвязную.

В работе [1, 2] представлены многоконтурные АСР, где для поддержания основной регулируемой переменной используются два или более регулирующих воздействия. В таком случае регулирующее воздействие с более благоприятными динамическими характеристиками влияния на регулируемую величину служит для непосредственного ее регулирования, а второе – для ввода в диапазон первого из них. В качестве регулируемой величины второго контура используется технологический параметр, характеризующий значение регулирующего воздействия.

Применение такой АСР позволяет организовать автоматическую коррекцию положения клапанов впрысков, где в качестве показателя регулирующего воздействия – расхода воды на впрыск – используются перепады температур на впрысках. Соответственно, для регулирования температуры перегретого пара, используется многосвязная работа трех локальных АСР [3]: температуры в промежуточном сечении тракта котла воздействием на соотношение вода – топливо, перепад температуры на первом и втором впрысках. Применение многосвязности ведет к усложнению настройки и дальнейшей эксплуатации регуляторов. Кроме этого, нарушение работы любого из контуров может привести к нарушению работы системы регулирования.

В качестве альтернативного решения предложена система, где в качестве основной регулируемой величины выступает температура пара на выходе.

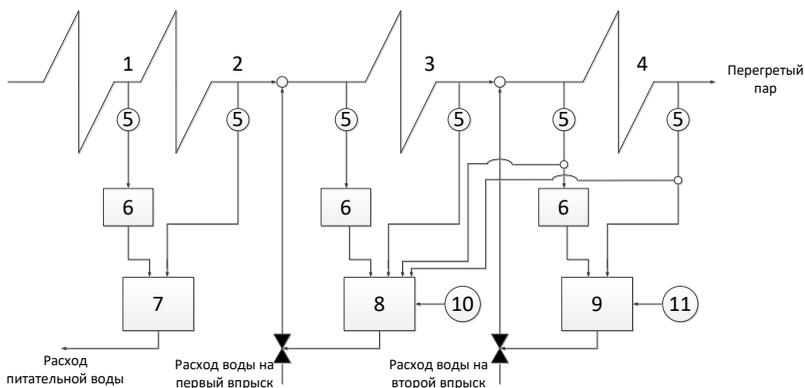


Рис. 1. Структурная схема многосвязной АСР температуры перегретого пара: 1 – экраны поворотной камеры, 2 – водяной экономайзер, 3 – ширмовый пароперегреватель, 4 – конвективный пароперегреватель, 5 – датчик температуры, 6 – дифференциатор, 7 – регулятор соотношения «вода–топливо», 8 – регулятор первого впрыска, 9 – регулятор второго впрыска, 10 – задатчик регулятора первого впрыска, 11 – задатчик регулятора второго впрыска

Регулирующим воздействием является расход воды на второй впрыск, поддержание оптимального положения клапана которого, осуществляется работой первого впрыска. В качестве задания на регулятор первого впрыска выступает сумма перепада температур на втором впрыске и температуры на выходе. Такая система обеспечивает необходимое открытие клапана второго впрыска, и фактически переводит регулирование всей системы на регулятор первого впрыска, что позволяет уменьшить взаимосвязь контуров регулирования.

Для подтверждения результатов были проведены опыты на имитационной модели объекта. При подаче возмущения по заданию 5°C на регулятор второго впрыска и при заданном перепаде температур на втором впрыске $\Delta T_{\text{впр}2} = 0^{\circ}\text{C}$ получены следующие результаты (рис. 2).

Из результатов видно, что регулятор второго впрыска обрабатывает возмущение и температура выходит на заданный уровень. При этом положение клапана второго впрыска остается неизменным и соответствует перепаду температур равному 0°C . Включение схемы во взаимосвязанную работу с регуляторами «вода - топливо», позволит в автоматическом режиме поддерживать более экономичный режим работы впрысков котла.

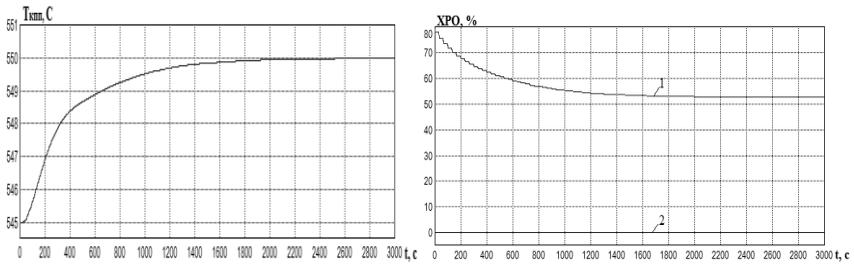


Рис. 2. Изменение температуры пара за конвективным пароперегревателем, изменение положения клапана первого впрыска (1) и второго впрыска (2)

Литература

1. **Биленко В.А.** Теория и практика многосвязного регулирования энергоблоков // Теплоэнергетика. 2010. № 10. С. 27–36.
2. **Усовершенствование** автоматических систем регулирования технологических параметров энергоблоков / В.А. Биленко, Э.Э. Микушевич, Д.Ю. Никольский и др. // Теплоэнергетика. 2008. № 10. С. 34–44.
3. **Ротач В.Я.** Теория автоматического управления, учебник для вузов, издательство МЭИ, М., 2008.

УДК 681.513.62

И.А.РЯБИКОВ, магистрант,
А.В.ГОЛУБЕВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: ryabik.ilya@ya.ru, kafsu@su.ispu.ru

Исследование влияния износа расходомерной диафрагмы на точность измерений и качество регулирования

Аннотация. Произведено исследование влияния расходомерной диафрагмы на точность измерений и качество регулирования подачи питательной воды. Исследование производилось на нелинейной, динамической и нестационарной имитационной модели котла ТГМП-314.

Ключевые слова: расходомерная диафрагма, точность измерений, качество регулирования, имитационная модель, ТГМП-314

I.A.RYABIKOV, student,
A.V.GOLUBEV, candidate of technical Sciences, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: ryabik.ilya@ya.ru, kafsu@su.ispu.ru

A study of the impact of wear flow diaphragm for accuracy and quality regulation

Abstract. Produced a research of the influence of the diaphragm on the accuracy flow measurement and the quality of regulation of the boiler water. The research was carried out on nonlinear, dynamic and non-stationary simulation model of the boiler.

Key words: flow diaphragm, precision measurement, quality control, simulation model, TGMP-314

В настоящее время для нужд измерения расходов, чаще всего, производится установка расходомерных устройств на трубопроводах с жидкими и газообразными средами.

Достаточно широко распространенным прибором для измерения расхода является диафрагма, обычно выполняемая в виде плоского кольца с круглым отверстием в центре, устанавливаемого между фланцами трубопровода [1].

Следует иметь в виду, что, являясь простым и эффективным инструментом для измерения расхода, диафрагма имеет и отрицательные стороны, а именно, создает значимое сопротивление потоку и в процессе эксплуатации её входная кромка неизбежно притупляется под влиянием потока, что приводит к появлению погрешностей при измерении расхода. Исследование влияния износа расходомерной диафрагмы на точность измерения расхода является актуальной задачей.

Исследования будем проводить путем моделирования участка трубопровода с диафрагмой и изменением её исходных характеристик - увеличение износа диафрагмы и как следствие увеличение внутреннего диаметра отверстия диафрагмы.

Например, для измерения расхода питательной воды прямооточного котла ТГМП-314 используется диафрагма, внутренний диаметр которой равен 103,203 мм (расчет выполнен по правилам измерения расхода РД 50-213-80 [2]).

Расход, вычисляемый кольцевыми дифманометрами (расходомерными диафрагмами), вычисляют по формуле:

$$Q_0 = 0.01252 \cdot \alpha \cdot K_t^2 \cdot d_{20}^2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (1)$$

Фактически из формулы (1) возможно измерить только перепад давления. Выразим его:

$$\Delta P = \left(\frac{Q_0}{0.01252 \cdot \alpha \cdot K_t^2 \cdot d_{20}^2} \right)^2 \cdot \rho \quad (2)$$

Внесем изменения в исходные характеристики диафрагмы, добавим износ сужающего устройства (изменим внутренний диаметр сужающего устройства) на 0.5% от расчетного.

$$d = d_{20} \cdot 1,005 = 103,203 \cdot 1,005 = 103,719 \text{ мм.}$$

Далее по формуле (2) считаем перепад давления при неизменном фактическом значении расхода, а затем по формуле (1) получившийся объемный расход. Проведем моделирование измерения расхода питательной воды с учетом износа сужающего устройства на 1%, 1,5% 2% и сведем данные расчета в табл.1.

Таблица. 1. Погрешность расчета расхода при износе сужающего устройства

Износ сужающего устройства, %	Диаметр сужающего устройства, мм	Перепад давления пит. воды на сужающем устройстве, кг/с	Расход питательной воды перед котлом, кг/с	Погрешность расчета расхода питательной воды, %
0	103,203	0,423	131,061	0
0,5	103,719	0,415	129,786	0,972
1	104,235	0,406	128,462	1,983
1,5	104,751	0,398	127,196	2,949
2	105,267	0,391	125,917	3,925

В результате исследований видно, что даже небольшой износ кромки сужающего устройства приводит к значительным погрешностям при измерении расхода среды, что нельзя не учитывать.

При использовании сужающих устройств в системах регулирования износ сужающего устройства может привести к ухудшению качества процесса управления. Проведем исследования влияния износа расходомерной диафрагмы на качество регулирования на примере АСР подачи питательной воды в прямоточный котел ТГМП-314 (рис. 1).

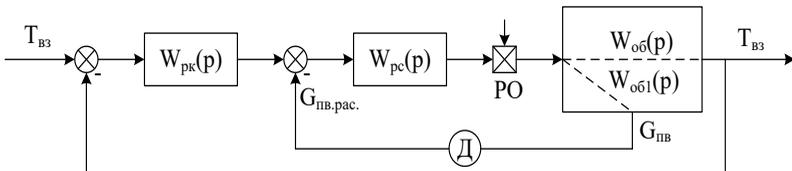


Рис. 1. Расчетная схема каскадной АСР

Исследования проводились на разработанной имитационной модели прямоточного котла ТГМП-314, выполненного в среде имитационного моделирования VisSim. Проведено моделирование каскадной системы автоматического регулирования, где во внутренний контур управления добавлена модель датчика измерения расхода питательной воды с учетом износа сужающего устройства.

В результате исследования получены переходные процессы температуры перед ВЗ, расчетного и фактического расхода питательной воды в каскадной АСР по внутреннему возмущению ($\Delta XPO=10\%$) с учетом износа сужающего устройства на 0%, 0,5%, 1%, 1,5% и 2% (рис. 2).

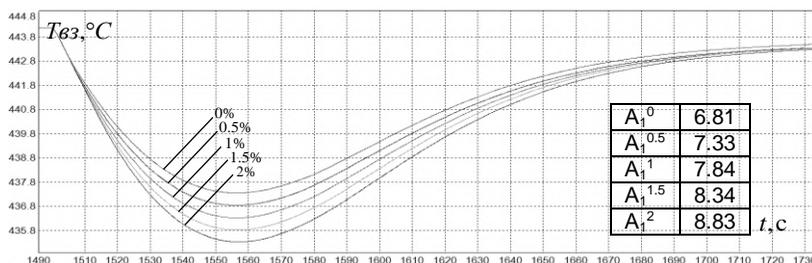


Рис. 2. Переходные процессы температуры перед ВЗ в каскадной АСР при внутреннем возмущении ($\Delta XPO=10\%$) с учетом износа сужающего устройства

В результате испытаний видим, что при износе расходомерной диафрагмы равном 2%, динамическая ошибка по температуре до ВЗ увеличилась на 29,7%, что еще раз доказывает, что даже небольшой износ кромки сужающего устройства приводит к ухудшению качества процесса регулирования.

Литература

1. **ГОСТ 8.586.2-2005** ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств: Межгос. стандарт. – Введ. 01.01.07 // Стандарты по издательскому делу. – М., 2007
2. **РД-50-213-80** Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами: Межгос. стандарт. – Введ. 01.07.82 // Стандарты по издательскому делу. – М.: Издательство стандартов, 1982 год
3. **Теория** и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. Кн. 3. Моделирование / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 176 с.

СЕКЦИЯ 6. «ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

Подсекция «ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

УДК 621.186.85

Н.А. МИШУРОВ, студент, А.Д. УГРЮМОВ, студент,
Д.М. МАГОМЕДСАЙГИТОВ, студент, А.Е. БАРОЧКИН¹, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: acorp27@yandex.ru¹

Недоотпуск тепловой энергии с горячей водой от ТЭЦ вследствие несоблюдения температурного графика

Аннотация: предложена методика определения величины недоотпуска тепловой энергии потребителям с горячей водой от ТЭЦ при работе в отопительном периоде по причине несоблюдения температурного графика.

Ключевые слова: температурный график, ТЭЦ, подогреватели сетевой воды.

N.A. MISHUROV, student, A.D. UGRYUMOV, student,
D.M. MAGOMEDSEIGHITOV, student,
A.E. BAROCHKIN Candidate of Engineering, docent,

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: acorp27@yandex.ru¹

Shortage of heat energy transferred with hot water from combined heat and power plant due to non-compliance of temperature diagram

Abstract: the authors proposed the method of calculating the value of shortage of heat energy transferred with hot water from combined heat and power plant due to non-compliance of temperature diagram during the heating season.

Key words: temperature diagram, heat and power plant, water heaters.

Температурный график определяет режим работы тепловых сетей, обеспечивая центральное регулирование отпуска тепла. По данным температурного графика определяется температура подающей и обратной воды в тепловых сетях, а также в абонентском вводе в зависимости от температуры наружного воздуха.

Для крупных систем теплоснабжения в СССР получило широкое распространение использование температурных графиков 150/70 и

130/70. В настоящее время, из-за проблем с надежностью при эксплуатации тепловых сетей на большинстве крупных ТЭЦ введены срезки температурного графика – ограничение температуры сетевой воды в подающей магистрали. Основными причинами введения срезки являются: превышение нормативного срока службы для трубопроводов тепловых сетей, неудовлетворительное техническое состояние линзовых компенсаторов, невозможность получения требуемой температуры сетевой воды из-за неудовлетворительного состояния теплофикационного оборудования на ТЭЦ, а также использование некоторых типов тепловой изоляции (например, пенополиуретана).

Анализ отпуска тепловой энергии с горячей водой от ТЭЦ в г. Ижевск, Пенза и Оренбург показывает, что фактическая срезка температурного графика занижена по сравнению с утвержденной срезкой. Для примера на рис. 1 приведено сравнение фактического отпуска тепловой энергии с горячей водой и утвержденного температурных графиков для Сакмарской ТЭЦ, расположенной в г. Оренбург, за 2015 г.

Сакмарская ТЭЦ отпускает тепловую энергию по температурному графику 150/70 со срезкой на 130 °С при температуре наружного воздуха -24 °С. Фактическая срезка при этом составляет 118 °С. Также можно заметить, что при температурах наружного воздуха от +2 до -20 °С имеется значительная амплитуда колебаний температуры сетевой воды в подающей магистрали. Разброс температур в обратной магистрали гораздо меньше чем прямой. Это связано с тем, что персонал станции за счет изменения температуры теплоносителя в подающей магистрали старается удерживать температуру в обратной магистрали в установленных значениях.

В результате при температурах наружного воздуха от +2 до -20 °С у потребителей имеет место перетоп – подача избыточного количества тепловой энергии с горячей водой, а при температурах ниже -20 °С происходит недотоп – подача недостаточного количества тепловой энергии с горячей водой.

Основной причиной несоответствия фактической температуры теплоносителя в подающей магистрали являются:

- 1) разрегулировка тепловой сети, которая приводит к необходимости подачи завышенного количества теплоносителя в тепловую сеть;
- 2) физический износ оборудования сетевой установки и трубопроводов тепловой сети от источника теплоснабжения до конечного потребителя, вследствие чего максимальная температура сетевой воды в подающей магистрали ограничена.

Для приведения фактического температурного графика к утвержденному виду, необходимы наладка всей системы теплоснабжения от ТЭЦ с целью приведения расхода сетевой воды к нормативному значению и замена физически изношенных сетевых подогревателей, что повлечет снижение недогрева в данных теплообменных аппаратах и повышение температуры сетевой воды в подающей тепломагистрали.

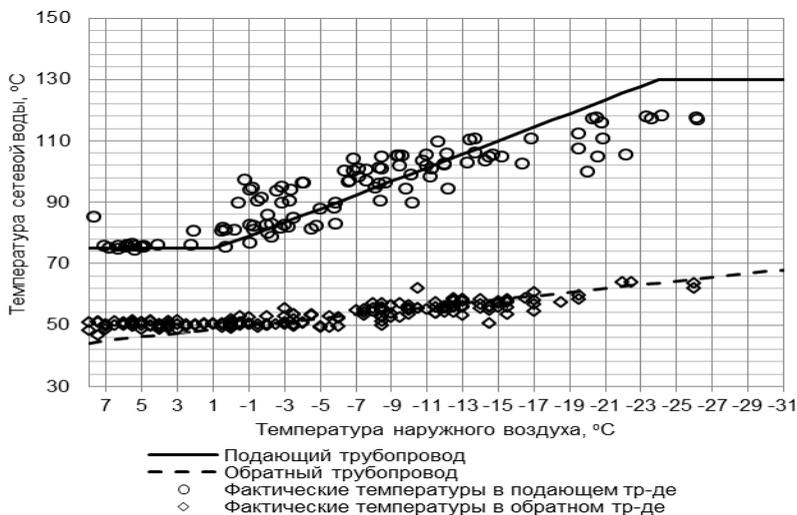


Рис. 1. Сравнение утвержденного и фактического температурных графиков Сакмарской ТЭЦ

Недоотпуск тепла с сетевой водой вследствие занижения температурного графика определяется по формуле, Гкал:

$$Q = G \cdot c \cdot \Delta t, \text{ Гкал}$$

где G , т/ч – расход сетевой воды; c , ккал/кг °С – теплоёмкость воды; Δt , °С – разница между температурами сетевой воды в подающем трубопроводе по утверждённому и фактическому температурным графикам; T , ч – продолжительность отпуска тепловой энергии в сеть по заниженному температурному графику.

Для Сакмарской ТЭЦ расход сетевой воды в отопительный период составляет 6658 т/ч, разница между температурами сетевой воды в подающем трубопроводе по утверждённому и фактическому температурным графикам составляет 12 °С, количество дней в отопительном периоде с температурами наружного воздуха ниже -20 °С равняется 12.

Таким образом, недоотпуск тепловой энергии с сетевой водой от Сакмарской ТЭЦ за отопительный период составил 23 тыс. Гкал. Данное обстоятельство влечет снижение балансовой прибыли теплоснабжающей организации филиал «Оренбургский» ПАО «Т Плюс», эксплуатирующей станцию.

Литература

1. СП 124.13330.2012 «СНиП 41-02-2003 «Тепловые сети. Актуализированная редакция».
2. СТО 70238424.27.010.003-2009 Тепловые сети. Условия создания. Нормы и требования.

УДК 621.311.22

А.П. ЗИМИН¹, аспирант, Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ¹, к.т.н., доцент,
В.А. БУДАНОВ², к.т.н., доцент,
С.Д. ГОРШЕНИН¹, к.т.н., ст. преподаватель,
А.Е. БАРОЧКИН¹, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru¹, bva@tef.ispu.ru²

Опыт использования алгоритма совместного сведения материальных и энергетических балансов по данным технического учета при расчете технико-экономических показателей ПГУ-ТЭС

Аннотация: на основе регуляризации Тихонова разработан алгоритм совместного сведения материальных и энергетических балансов по результатам измерений параметров потоков теплоносителей парогазовой ТЭС; выполнена оценка влияния предложенного подхода на результаты расчета технико-экономических показателей оборудования.

Ключевые слова: некорректная задача, регуляризация Тихонова, парогазовый энергоблок, тепловая экономичность ТЭС, математическая модель.

A.P. ZIMIN postgraduate student,
G.V. LEDUHOVSKY Candidate of Engineering, docent,
V.A. BUDANOV Candidate of Engineering, docent,
S.D. GORSHENIN Candidate of Engineering, senior lecturer,
A.E. BAROCHKIN Candidate of Engineering, associate professor
Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru¹, bva@tef.ispu.ru²

The experience of using the algorithm for joint solving the equations of material and energy balances based on technical data when calculating the technical and economic performance of combined-cycle thermal power plant

Abstract: based on Tikhonov regularization the authors developed the algorithm of joint solving the equations of material and energy balances using the results of measurements of the parameters of heat carrier flows in combined-cycle thermal power plant; the authors estimated impact of the proposed approach for calculation of technical and economic performance of the equipment.

Key words: ill-posed problem, Tikhonov regularization, combined-cycle unit, the thermal efficiency of thermal power plant, mathematical model.

В соответствии с требованиями нормативных документов энергетической отрасли сведение материальных и энергетических балансов по данным технического учета предписывается на предварительном этапе расчета показателей тепловой экономичности ТЭС. Порядок сведения

балансов, установленный нормативными документами, требует доработки, поскольку характеризуется следующими недостатками: 1) материальный и энергетический балансы сводятся последовательно, при этом расходы, давления и температуры теплоносителей оказываются неувязанными с мощностью соответствующих потоков; 2) материальный баланс сводится таким образом, что исходная невязка баланса распределяется между приходной и расходной частями балансовых уравнений в равных долях, при этом оказываются неучтенными метрологические характеристики соответствующих приборов, точность тех или иных экспертных оценок; 3) сведение балансов предписывается лишь по нескольким основным контурам тепловой схемы ТЭС: материальный баланс – от расходомеров питательной воды до расходомеров свежего пара турбоагрегатов, тепловой баланс – по ТЭС в целом; не менее значимые технологические системы (теплофикационная установка, паропроводы собственных нужд) остаются за рамками балансовых расчетов. На современном этапе, учитывая повсеместное развитие информационных технологий сбора и обработки информации, поступающей от систем технического учета показателей работы оборудования ТЭС, открываются возможности повышения объективности результатов расчетов показателей тепловой экономичности путем более обоснованного сведения материальных и энергетических балансов.

Нами разработан метод совместного сведения материальных и энергетических балансов в энергетических системах в условиях некорректности исходной информации [1], предусматривающий разработку модели структуры потоков в системе на основе теории графов, формулировку оптимизационной задачи в рамках концепции регуляризации Тихонова и её численное решение методом статистического программирования. В рамках рассматриваемого этапа работы выполнена практическая реализация разработанного метода в составе программно-технического комплекса ПГУ-ТЭС «Международная» (г. Москва), состоящей из двух энергоблоков ПГУ-110 и ПГУ-116, выполненных по схеме «2 газотурбинных установки (ГТУ) + 2 котла-утилизатора (КУ) двух давлений + 1 паровая турбина (ПТ) с противодавлением + 1 пиковый водогрейный котел (ПВК)». Работа ПГУ по электрическому графику обеспечивается суховоздушными градирнями, в которых осуществляется отвод избыточной теплоты от сетевой воды. В данном случае в дополнение к разработанной в соответствии [1] подсистеме совместного сведения материальных и энергетических балансов в тепловой схеме водопаровой части ТЭС в рамках той же концепции разработана подсистема сведения материальных и энергетических балансов по каждой из газотурбинных установок, обеспечивающая определение балансовых значений расхода воздуха на компрессор, расхода топлива в камеру сгорания, расхода дымовых газов за турбиной, теплофизических параметров указанных теплоносителей, электрической мощности установки, а также потерь тепловой энергии по установке. Полученная математи-

ческая модель реализована в виде программного модуля в составе программно-технического комплекса ТЭС по расчету фактических и номинальных показателей тепловой экономичности оборудования и используется при проведении расчетов как за сутки, так и за месяц.

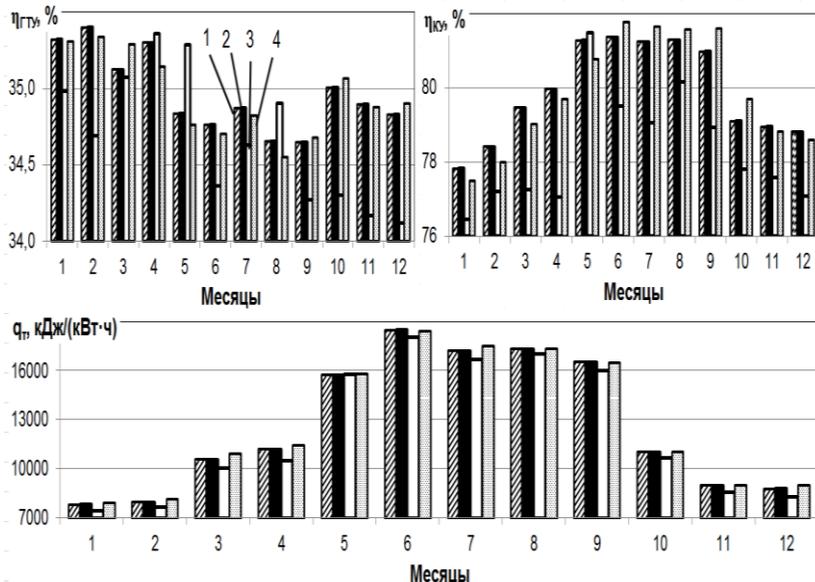


Рис. 1. Показатели работы оборудования ПГУ-ТЭС при расчете без сведения балансов и со сведением балансов по месяцам года:

$\eta_{гр}$ и $\eta_{кв}$, % – КПД брутто соответственно по группе газотурбинных установок и по группе котлов-утилизаторов; q_t , кДж/(кВт·ч) – удельный расход теплоты брутто на выработку электроэнергии по группе паровых турбин; 1 – фактическое значение, рассчитанное по прямому балансу; 2 – фактическое значение, рассчитанное по обратному балансу после совместного сведения материальных и тепловых балансов; 3 – фактическое значение, рассчитанное по обратному балансу без сведения материальных и тепловых балансов; 4 – номинальное значение

По результатам тестирования программного модуля в течение года выявлено следующее:

1) сведение балансов по данным технического учета слабо влияет на фактические и номинальные значения удельных расходов топлива, поскольку при расчете фактических значений используются только данные коммерческого учета количества сожженного топлива, отпуска электрической и тепловой энергии, а на результат расчета номинального количества сожженного топлива влияют лишь показатели ГТУ;

2) промежуточные показатели тепловой экономичности без проведения работы по сведению балансов оказываются существенного искаженными и неувязанными между собой;

3) при реализации предложенного метода сведения балансов не только устраняется указанный в п. 2) недостаток, но и обеспечивается существенно более полное соответствие номинальных значений показателей и фактических значений, рассчитанных по обратному балансу (рис. 1), что позволяет оценить качество нормативно-технической документации ТЭС по топливоиспользованию.

Литература

1. **Алгоритмы сведения** материальных и энергетических балансов при расчетах технико-экономических показателей оборудования ТЭС на основе метода регуляризации некорректны задач / Ледуховский Г.В., Жуков В.П., Барочкин Е.В., Зимин А.П., Разинков А.А. // Теплоэнергетика, 2015, № 8, с. 72-80.

УДК 621.311.22

Ю.Е. БАРОЧКИН¹, аспирант,
Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ¹, к.т.н., доцент,
В.П. ЖУКОВ², д.т.н., профессор,
Е.В. БАРОЧКИН¹, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru¹, zhukov-home@yandex.ru²

Термодинамический подход к моделированию десорбции растворенного кислорода при попадании перегретой воды в зону пониженного давления

Аннотация: в рамках термодинамического подхода разработана математическая модель десорбции растворенного кислорода из воды при её попадании в зону пониженного давления; проведены экспериментальные исследования, по результатам которых подтверждена эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: десорбция растворенного кислорода; термическая деаэрация, начальный эффект, математическая модель, термодинамический подход.

Y.E. BAROCHKIN, postgraduate student,
G.V. LEDUHOVSKY, Candidate of Engineering, docent,
V.P. ZHUKOV, Doctor of Engineering, professor
E.V. BAROCHKIN, Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru, zhukov-home@yandex.ru

The thermodynamic approach to model desorption of dissolved oxygen when superheated water enters the zone of reduced pressure

Abstract. Using the thermodynamic approach was developed the mathematical model of dissolved oxygen desorption when it enters the low pressure zone; authors performed experimental studies which confirmed the effectiveness of the proposed approach.

Key words: desorption of dissolved oxygen, thermal deaeration, the initial effect, mathematical model, thermodynamic approach.

В термических деаэраторах часто применяются ступени, работающие на, так называемом, начальном эффекте, принцип действия которых основан на интенсивном вскипании воды при её попадании в зону пониженного давления [1]. Для моделирования газообмена в таких ступенях применяют, как правило, эмпирические зависимости [1]. Такой подход не позволяет в полной мере учесть влияние режимных параметров на интенсивность массообменных процессов, что затрудняет моделирование деаэратора в целом. В связи с этим актуальной научной задачей является разработка более универсальной математической модели десорбции растворенного кислорода в деаэрационных ступенях рассматриваемого типа.

При разработке математической модели использован термодинамический подход к анализу состояния перегретой жидкости, который позволяет получить удобные для практического использования интегральные оценки эффективности процесса [2, 3]. В рамках этого подхода для оценки начального эффекта предлагается рассматривать механизм захвата растворенного кислорода паровыми пузырьками при их мгновенном образовании за счет уменьшения давления. Считаем, что при парообразовании пузырьки пара «захватывают» число молекул (массовую долю) растворенного кислорода пропорционально мольной доле пара в смеси, которая соответствует объемной доле компонента в смеси [4]. Итоговое выражение для расчета относительного уменьшения массовой концентрации растворенного кислорода в воде на входе и выходе ступени получено в виде

$$\frac{C_2}{C_{20}} = \left(\frac{Ar}{Ku} + 1 \right)^{-1}; \quad Ar = \frac{\rho_g}{\rho_n} - 1; \quad Ku = \frac{r}{c\Delta T},$$

где C_2 и C_{20} – массовая концентрация растворенного кислорода в воде соответственно на выходе и на входе ступени; A_r – критерий Архимеда; ρ_v и ρ_n – плотность воды и пара соответственно; K_u – критерий Кутателадзе; r, c – удельная теплота парообразования и удельная теплоемкость воды соответственно; ΔT – охлаждение деаэрируемой воды в ступени.

Согласно полученному выражению, десорбция растворенного кислорода за счет начального эффекта определяется, в основном, величиной охлаждения воды в деаэраторе ΔT , которая, в свою очередь, зависит от давления в аппарате и температуры воды перед ним. Это согласуется с опубликованными результатами исследований начального эффекта деаэрации применительно к вакуумным деаэраторам классической конструкции [1].

Проверка предложенного подхода к моделированию выполнена по экспериментальным данным, полученным в ходе испытаний двухступенчатой деаэрационной установки ДЦВ-200. Первой ступенью этой установки является центробежно-вихревой деаэратор, второй ступенью – капельные деаэрационные устройства, встроенные в деаэрационный бак. Обе ступени работают на воде, перегретой по отношению к температуре насыщения при соответствующем давлении. Эвакуация выпара осуществляется эжектором. Для определения концентрации растворенного кислорода в воде по элементам схемы деаэрационная установка оборудована зондами для отбора воды после каждой ступени деаэрации. В ходе испытаний получены данные о технологической эффективности элементов деаэрационной установки при различных значениях режимных параметров. Для проверки адекватности предложенного математического описания начального эффекта на рис. 1 выполнено сопоставление опытных данных с результатами расчетов, полученных для аналогичных условий каждого опыта. При этом ступени деаэрации рассматривались как отдельно, так и совместно. В последнем случае C_{20} , C_2 и ΔT определялись для установки в целом.

Данные рис. 1 показывают, что предложенная теоретическая зависимость при качественно верном прогнозировании экспериментальных данных количественно дает заниженные значения C_2 . Это можно объяснить тем, что термодинамический подход не учитывает время пребывания воды в аппарате, а полученная заниженная концентрация растворенного в воде кислорода соответствует асимптотическому по времени состоянию. Для количественной корректировки предложенное математическое описание начального эффекта должно быть уточнено путем введения поправки на реальное время пребывания воды в ступени. Этот подход рассматривается авторами как направление дальнейших исследований.

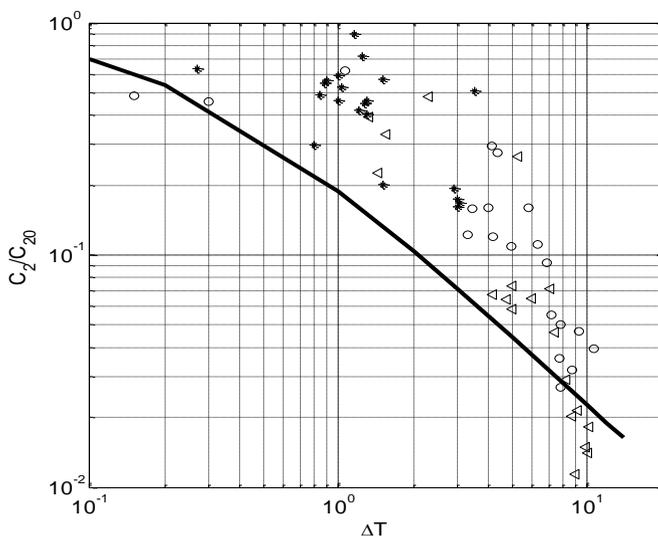


Рис. 1. Сопоставление результатов расчета (линия) и экспериментальных данных (точки) по десорбции растворенного кислорода:

* – в центробежно-вихревой ступени, o – в капельной ступени,
 Δ – совместно в центробежно-вихревой и в капельной ступенях

Литература

1. **Оликер, И. И.** Термическая деаэрация воды в отопительно-производственных котельных и тепловых сетях / И. И. Оликер. – Л.: Стройиздат, 1972. – 137 с.
2. **Зельдович, Я. Б.** Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика / Я.Б. Зельдович. – М.: Наука, 1984. – 374 с.
3. **Коновалов, В.И.** Техническая термодинамика / В.И. Коновалов. – Иваново, 2005. – 620 с.
4. **Касаткин, А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии / А.Г. Касаткин. – М.: Химия, 1971. – 784 с.

УДК 621.311.22

Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, к.т.н., доцент
 Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
 153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
 E-mail: admin@tes.ispu.ru

Эмпирическое обеспечение ячеечных моделей теплообмена и десорбции растворенного кислорода в элементах деаэраторов

Аннотация: разработано эмпирическое обеспечение ячеечных моделей теплообмена и десорбции растворенного кислорода в струйных отсеках, непроточных барботажных листах и затопленных барботажных устройствах деаэраторов, включающее методы расчета площади межфазной поверхности и коэффициентов тепло- и массопередачи.

Ключевые слова: термическая деаэрация, математическая модель, коэффициент теплопередачи, коэффициент массопередачи.

G.V. LEDUHOVSKY Candidate of Engineering, docent,
 Ivanovo State Power Engineering University
 153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
 E-mail: admin@tes.ispu.ru

The empirical support of cell models of heat exchange and desorption of dissolved oxygen in deaerators

Abstract: the authors developed the empirical support of cell models of heat exchange and desorption of dissolved oxygen in stream units, flooded bubbling devices of deaerators. The empirical support combines methods for calculating the interfacial surface and coefficients of heat and mass transfer.

Key words: thermal deaeration, mathematical model, heat transfer coefficient, mass transfer coefficient.

Ранее разработаны ячеечные модели процессов тепломассообмена и десорбции растворенного кислорода в струйных отсеках, непроточных барботажных листах, затопленных барботажных устройствах [1]. Для практического применения моделей необходимо разработать эмпирическое обеспечение, включающее методы расчета площади поверхности контакта фаз, коэффициентов тепло- и массопередачи, что является целью данной работы. Рассмотрим результаты работы.

1. Струйные отсеки:

$$F_{\text{стр}} = \frac{2\pi ndW_{\text{ж}}^2}{3\mu^{3/2}g} \left[\left(1 + \frac{2\mu^2 gL}{W_{\text{ж}}^2} \right)^{3/4} - 1 \right]; L = 3W_{\text{ж}} \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж}}^{\text{вх}} d^3}{\sigma_{\text{ж}}}};$$

$$F_{\text{кап}} = k_{\text{кап}} \frac{2\pi ndW_{\text{ж}}^2}{3\mu^{3/2}g} \left[\left(1 + \frac{2\mu^2 g(H-L)}{W_{\text{ж}}^2} \right)^{3/4} - 1 \right]; F = F_{\text{стр}} + F_{\text{кап}};$$

$$Nu = 94,51 \cdot 10^3 \cdot K_L^{-1,40} \text{Lap}^{0,06} \text{Fr}^{-0,45} \text{Pr}^{-2,16} K^{-0,84}; \quad Nu = \frac{kd}{\lambda_{\text{ж}}};$$

$$\text{Sh} = 9,50 \cdot 10^{-5} K_L^{-0,19} \text{Lap}^{0,26} \text{Fr}^{0,37} \text{Sc}^{-0,65} K^{-1,07}; \quad \text{Sc} = \frac{\nu_{\text{ж}}}{D_{\text{ж}}};$$

$$\text{Lap} = \frac{\rho_{\text{ж}} W_n^2 d}{\sigma_{\text{ж}}}; \quad \text{Fr} = \frac{W_{\text{ж}}^2}{gd}; \quad \text{Pr} = \frac{\nu_{\text{ж}}}{a_{\text{ж}}}; \quad K = \frac{r}{c_{\text{ж}}(t_2 - t_1)}; \quad \text{Sh} = \frac{k_m d}{D_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}},$$

где $F_{\text{стр}}$, $F_{\text{кап}}$, F , м^2 – площадь межфазной поверхности соответственно в зоне чисто струйного режима, в зоне после распада струй и суммарная; n – число отверстий струеобразующей тарелки; d , м – диаметр отверстий; $W_{\text{ж}}$, м/с – средняя скорость истечения воды из отверстий струеобразующей тарелки; μ – коэффициент расхода; g , м/с^2 – ускорение свободного падения; L , м – высота зоны чисто струйного режима течения воды; $\rho_{\text{ж}}^{\text{вх}}$, кг/м^3 – плотность воды на входе в отсек; $\sigma_{\text{ж}}$, Н/м – коэффициент поверхностного натяжения воды при средней температуре воды; $k_{\text{кап}}$ – поправочный коэффициент, учитывающий увеличение площади межфазной поверхности в зоне после распада струи (в среднем равен 1,5); H , м – полная высота струйного отсека; $\rho_{\text{ж}}$, кг/м^3 – средняя плотность воды; Nu , Sh , $K_L = H/L$, Lap , Fr , Pr , K и Sc – критерии соответственно Нуссельта, Шервуда, геометрического подобия, Лапласа, Фруда, Прандтля, Кутателадзе и Шмидта; k , $\text{Вт/(м}^2\text{К)}$, и k_m , $\text{кг/(м}^2\text{с)}$ – средние по поверхности контакта фаз коэффициенты теплопередачи и массопередачи по растворенному кислороду; $\gamma_{\text{ж}}$, $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$, $\nu_{\text{ж}}$ и $a_{\text{ж}}$, $\text{м}^2/\text{с}$ – средние коэффициент соответственно теплопроводности, кинематической вязкости и температуропроводности воды; W_n , м/с – средняя скорость пара в отсеке; g , кДж/кг – скрытая теплота парообразования при среднем давлении в отсеке $p_{\text{ср}}$; $c_{\text{ж}}$, $\text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}$ – средняя массовая изобарная теплоемкость воды; t_1 и t_2 , $^{\circ}\text{C}$ – температура воды соответственно на входе и выходе отсека; $D_{\text{ж}}$, $\text{м}^2/\text{с}$ – коэффициент молекулярной диффузии кислорода в воде при её средней температуре.

Модель характеризуется средним квадратическим отклонением (СКО) по расчету температуры воды за струйным отсеком 9,5 %, по расчету массовой концентрации растворенного кислорода за струйным отсеком – 19,1 %. Модель справедлива при следующих условиях: d – от 0,006 до 0,01 м; H – от 0,3 до 0,95 м; $p_{\text{ср}}$ – от 109 до 137 кПа; $W_{\text{ж}}$ – от 0,2 до 3,0 м/с; W_n – от 0,8 до 48,2 м/с.

2. Непровальные барботажные листы:

$$f = \frac{6\varphi}{d_n}; \quad \varphi = \frac{\text{Fr}_{\text{бл}}^{0,5}}{1 + \text{Fr}_{\text{бл}}^{0,5}}; \quad \text{Fr}_{\text{бл}} = \frac{W_{\text{пр}}^2}{gh_d}; \quad h_d = (0,8 - 0,117\rho_n W_{\text{пр}}^2) \cdot h_0;$$

$$d_n = 7,3 \cdot 10^{-3} \text{Re}_{0,n}^{-0,05}; \quad \text{Re}_{0,n} = \frac{W_0 d_0 \rho_n}{\mu_n};$$

$$\text{Nu} = 85,38 \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right)^{-0,45} \frac{1}{\text{Fr}_6}; \quad \text{Sh} = 7,14 \cdot 10^{-14} \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_{ж}} \right)^{-2,44} \text{Fr}_6^{-0,71}; \quad \text{Fr}_6 = \frac{G_n}{\rho_n F_6 \sqrt{gh_{66}}};$$

$$h_{66} = \frac{1}{2g} \left(\frac{4G_b}{\pi d_0^2 n \mu_{рж}} \right)^2,$$

где f , $\text{м}^2/\text{м}^3$ – удельная площадь межфазной поверхности; φ – паросодержание двухфазного слоя на листе; d_n , м – средний диаметр паровых пузырьков в двухфазном слое; $\text{Fr}_{6л}$ – критерий Фруда для барботажного листа; $W_{пр}$, м/с – приведенная скорость пара; h_d , м – высота динамического слоя жидкости на листе; h_0 , м – высота слоя жидкости на листе с заданной высотой переливного порога без барботажа; $\text{Re}_{0,n}$ – критерий Рейнольдса в отверстиях; W_0 , м/с – скорость пара в отверстиях; d_0 , м – диаметр отверстий; μ_n , $\text{Па}\cdot\text{с}$ – динамическая вязкость пара; Fr_6 – критерий Фруда для условий выхода пара из отверстий; ρ_n , кг/м^3 – плотность пара; $G_{ж}$ и G_n , кг/с – массовые расходы соответственно жидкости и пара; F_6 , м^2 – площадь поверхности барботажного листа; h_{66} , м – уровень воды на листе, который установился бы при отсутствии пропуска пара через отверстия; p_n , Па – абсолютное давление пара под листом; n – количество отверстий; μ – коэффициент расхода.

Модель имеет следующие границы применимости: $d_0 = 0,007$ м ; p_n – от 114 до 150 кПа ; $\text{Re}_{0,n} > 7000$. СКО по расчету температуры воды за непровальным барботажным листом 3,3 %, по расчету массовой концентрации растворенного кислорода за листом – 2,0 %.

3. Затопленные барботажные устройства деаэрационных баков в виде горизонтального перфорированного коллектора на дне бака:

$$\text{Sh} = 6,36 \cdot 10^{-4} \cdot \text{Fr}_6^{-0,11} d_6^{-0,56}; \quad \text{Fr}_6 = \frac{G_n}{\rho_n F_{\text{бак}} \sqrt{gh_r}},$$

где d_6 , кг/т – удельный расход пара на барботаж; $F_{\text{бак}}$, м^2 – площадь горизонтального сечения бака на среднем уровне; h_r , м – гидростатический уровень воды в баке; определяющим размером при расчете критерия Шервуда принят диаметр отверстий барботажного коллектора d_0 .

Удельная площадь межфазной поверхности определяется при этом согласно [2]. Уравнение охватывает следующие условия: $d_0 = 0,012$ м ; d_6 – от 5,0 до 37,6 кг/т ; h_0 – от 1,4 до 2,2 м . СКО по расчету массовой концентрации растворенного кислорода на выходе – 5,7 %.

Литература

1. Жуков, В.П. Системный анализ энергетических тепломассообменных установок / В.П. Жуков, Е.В. Барочкин. – Иваново: ИГЭУ, 2009. – 176 с.
2. Разработка эмпирического обеспечения ячеечной модели деаэрации воды в деаэрационных баках с затопленным барботажным устройством / С.Д. Горшеннин, А.Ю. Ненаездников, Г.В. Ледуховский [и др.] // Вестник ИГЭУ. – 2013. – вып. 5. – С. 9–13.

УДК 621.527.4

И.Б. МУРМАНСКИЙ, аспирант,
К.Э. АРОНСОН, д. т. н., профессор,
Н.В. ЖЕЛОНКИН, к. т. н., доцент

Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
620002 г. Екатеринбург, ул. Мира 19
E-mail: lta_ugtu@mail.ru

Исследование эффективности применения нового эжектора ЭПО-3-80 для турбины К-200-130

Аннотация: проведены испытания нового эжектора для паротурбинной установки К-200-130, получены характеристики при двух положениях сопел, даны рекомендации по работе эжектора.

Ключевые слова: пароструйный эжектор, испытания, характеристика.

I.B. MURMANSKII, postgraduate,
K.E. ARONSON, Doct. of Tech. Sci., professor,
N.V. ZHELONKIN, Cand. of Tech. Sci., associate professor

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin
620002 Mira str. 19, Ekaterinburg, Russia
E-mail: lta_ugtu@mail.ru

Efficiency research of the new ejector EPO-3-80 application for the K-200-130 turbine

Abstract: tests of the new ejector for the K-200-130 steam-turbine unit have been carried out, performances are obtained at two positions of the nozzles and recommendations are formulated for the ejector operation.

Keywords: steam-jet ejector, tests, performance.

Эжектор ЭПО-3-80 представляет собой пароструйный насос с тремя ступенями сжатия и тремя охладителями паровоздушной смеси, размещенными в отдельных корпусах.

Принципиальная схема работы эжектора, а также сопла, диффузоры, трубные системы и прочие элементы пароструйного эжектора рассчитаны и спроектированы сотрудниками кафедры «Турбины и двигатели» Уральского федерального университета [1-3].

Согласно паспорту, эжектор типа ЭПО-3-80 имеет номинальную рабочую производительность на сухом (атмосферном) воздухе 80 кг/ч при температуре охлаждающего конденсата не выше 50°C.

Охладители эжектора выполнены в отдельных корпусах для исключения перетока паровоздушной смеси в ступень с меньшим давлением.

Целью настоящей работы являлось проведение испытаний нового основного эжектора ЭПО-3-80 для получения фактических характеристик работы эжектора на сухом (атмосферном) воздухе, определения

оптимального давления рабочего пара, нахождения оптимального осевого расстояния между соплом и камерой смешения каждой ступени, составления рекомендаций по эксплуатации эжектора в составе конденсационной установки.

Испытания эжектора состояли из следующих этапов.

- Получение рабочей характеристики эжектора на различных давлениях рабочего пара при расчётном положении сопел в ступенях эжектора.

- Изменение расчётных положений сопел в ступенях эжектора на оптимальные по результатам первого этапа испытаний. Получение новых рабочих характеристик эжектора на различных давлениях рабочего пара.

По результатам первого этапа испытаний получены характеристики эжектора при давлении рабочего пара $P_{\text{раб}} = 0,6-0,7$ МПа и расчётном положении сопел. Для примера характеристики представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что давление, создаваемое первой ступенью при нулевом расходе воздуха через эжектор, составляет $P_1 < 1$ кПа. При расходе воздуха до 90 кг/ч первая ступень эжектора работает на так называемом «рабочем» участке характеристики (при расходе воздуха $G_{\text{возд}} = 90$ кг/ч давление в первой ступени $P_1 = 4,5$ кПа). Далее эжектор переходит на «перегрузочный» участок характеристики.

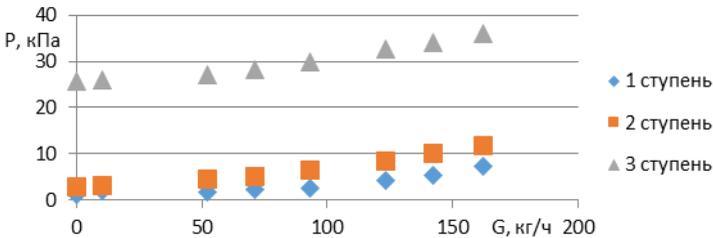


Рис. 1. Характеристика работы эжектора ЭПО-3-80 при давлении рабочего пара $P_{\text{раб}} = 0,7$ МПа и расчётном положении установки сопел

При увеличении давления рабочего пара на эжектор, рабочая характеристика 1-й ступени прошла ниже, кроме того, рабочая производительность эжектора увеличилась до 180 кг/ч по «сухому воздуху» (при расходе воздуха $G_{\text{возд}} = 90$ кг/ч давление в первой ступени составило $P_1 = 2,6$ кПа).

На втором этапе испытаний положение сопел I и II ступеней было изменено. Расстояния между соплами I и II ступеней и соответствующим камерами смешения были уменьшены для углубления создаваемого вакуума. При выборе оптимального положения сопел учитывалось существующее на момент испытаний количество присосов воздуха на турбине.

Для сравнения на рис. 2 приведены характеристики работы I ступени эжектора при различных положениях сопел (расчетном и оптимальном).

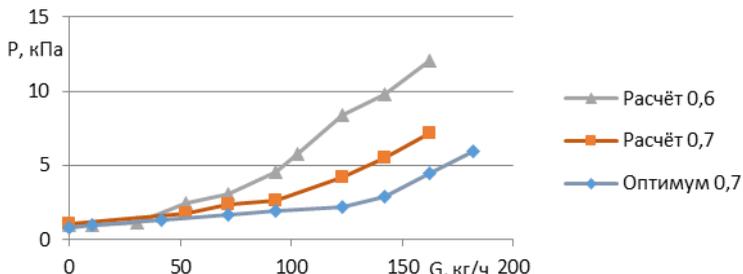


Рис. 2. Характеристика работы I ступени эжектора ЭПО-3-80 при различных давлениях рабочего пара ($P_{\text{раб}} = 0,6-0,7$ МПа) и различных положениях установки сопел

Как видно из рис. 2, изменение расстояния между соплом и диффузором I ступени незначительно углубило вакуум, создаваемый ступенью ($P_1 = 0,8$ кПа), и в то же время увеличило длину «рабочего» участка характеристики эжектора. При расходе воздуха $G_{\text{возд}} = 90$ кг/ч и давлении рабочего пара $P_{\text{раб}} = 0,7$ МПа давление в первой ступени составляет $P_1 = 1,9$ кПа.

При эксплуатации эжектора ЭПО-3-80 в случае значительных присосов воздуха в вакуумную систему рекомендуется поддерживать давление рабочего пара от $P_{\text{раб}} = 0,7$ МПа до $P_{\text{раб}} = 0,6$ МПа.

По результатам проведённых испытаний можно сделать следующие основные выводы.

1. В результате настройки и испытаний эжектора ЭПО-3-80 выбрано оптимальное положение сопел всех трёх ступеней, позволяющее обеспечить глубокое разрежение при высокой производительности. Положение сопел выбрано, исходя из действующего количества присосов на турбине.

2. Максимальная производительность эжектора ЭПО-3-80 составляет $G_{\text{возд}} = 180$ кг/ч, при этом давление всасывания не превышает $P_1 = 6$ кПа.

3. Рекомендуется поддерживать давление рабочего пара на эжектор ЭПО-3-80 не ниже $P_{\text{раб}} = 0,7$ МПа.

Литература

1. Берман Л.Д., Зингер Н.М. Воздушные насосы конденсационных установок паровых турбин. М.: ГЭИ, 1962, 96 с.
2. РД 34.30.302-87. Методические указания по наладке и эксплуатации пароструйных эжекторов конденсационных установок турбин ТЭС и АС / Белевич А.И. // М.: Минэнерго СССР, 1990. 34 с.
3. Аронсон К.Э. Эжекторы конденсационных установок паровых турбин: учебное пособие / К.Э. Аронсон, А.Ю. Рябчиков, Д.В. Брезгин, И.Б. Мурманский. Екатеринбург: Изд-во Урал. фед. ун-та, 2015. 131 с.

УДК 519.816:620.9

A.C. НЕФЕДОВ, аспирант
Братский государственный университет
665709 г. Братск, ул. Макаренко 40
E-mail: domino1991@rambler.ru

Решение задачи выбора источника энергоснабжения методом анализа иерархий

Аннотация. Рассматривается практическое применение метода анализа иерархий для решения задачи многокритериального выбора источника энергоснабжения потребителя. Формулируются критерии и альтернативы. Приводятся основные этапы метода анализа иерархий.

Ключевые слова: энергетика, критерии, анализ, метод анализа иерархий.

A.S. NEFEDOV, postgraduate student
Bratsk state university
665709 Bratsk, Makarenko St. 40
E-mail: domino1991@rambler.ru

Solution of the problem of choosing the source of power supply by the analytical hierarchy method

Abstract. The practical application of the analytic hierarchy process for solving the multicriterion choice problem of the consumer power supply source is considered. Criteria and alternatives are formulated. The main stages of the analytic hierarchy process are given.

Key words: power engineering, analytic hierarchy process.

В настоящее время освоение и развитие северо-востока страны требует укрепления и расширения энергетической и транспортной инфраструктуры [1, 2]. Строительство энергетических объектов, таких как электростанция, является сложной комплексной проблемой, требующей учета многочисленных факторов [3-5]. Решение задачи затруднено высокой степенью неопределенности исходной информации и будущих условий развития осваиваемых районов. В статье предлагается решение такой задачи с помощью метода анализа иерархий (МАИ) [6].

При решении многокритериальной задачи лицо, принимающее решение (ЛПР), формулирует критерии, по которым оценивается альтернатива: K1 – стоимость строительства источника энергоснабжения, млн. руб; K2 – экологическое воздействие; K3 – условия для строительства, работы и обслуживания (наличие топливной базы, оценка развитости транспортной структуры и др.) K4 – надежность энергоснабжения; K5 – влияние социальных факторов (учет предпочтений населения, оценка традиционного быта населения и др.).

В качестве альтернатив в статье рассматривается тепловая электростанция (ТЭС), атомная станция малой мощности (АС ММ), дизель-

ная электростанция совместно с ветровой электростанцией (ДЭС+ВЭС), ветровая электростанция совместно с солнечной электростанцией (ВЭС+СЭС) и малая гидроэлектростанция (МГЭС).

При использовании МАИ нет необходимости давать количественную оценку по каждому из критериев, достаточно выразить степень превосходства альтернатив по отдельным критериям с помощью специальной шкалы (табл. 1).

Таблица 1. Шкала парных сравнений

Уровень важности	Количественное значение
Равная важность	1
Умеренное превосходство	3
Существенное превосходство	5
Значительное превосходство	7
Очень большое превосходство	9

Результаты сравнения формируют матрицы парных сравнений. В табл. 2 представлен пример заполнения матрицы парных сравнений альтернатив по критерию К1.

Таблица 2. Парные сравнения альтернатив по критерию К1

К1	A1	A2	A3	A4	A5
A1	1	5	3	9	3
A2	0,2	1	0,333	5	0,2
A3	0,333	3	1	7	0,333
A4	0,111	0,2	0,142	1	0,111
A5	0,333	5	3	9	1

После сравнения альтернатив по критериям необходимо выполнить парные сравнения критериев (табл. 3).

Таблица 3. Матрица парных сравнений критериев и определение коэффициентов важности

	K1	K2	K3	K4	K5	Коэффициенты важности (w_i)
K1	1	7	3	5	7	0,5101
K2	0,142	1	0,2	0,333	1	0,0537
K3	0,333	5	1	3	5	0,2594
K4	0,2	3	0,333	1	3	0,1230
K5	0,142	1	0,2	0,333	1	0,0537

Вычислив собственный вектор матрицы парных сравнений, проведя нормирование элементов собственного вектора, можно получить веса критериев. Определение собственного вектора матрицы $\lambda=(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$ может проводиться по известному выражению [5, 6]:

$$\lambda_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n c_{ij}}, \quad (1)$$

где λ_i – элемент собственного вектора матрицы, соответствующий критерию или альтернативе i ; c_{ij} – оценка шкалы относительной важности пар критериев или альтернатив i и j ; n – количество критериев или альтернатив.

Вес критерия w_i или альтернативы v_{ij} определяется нормированием элементов собственного вектора. Вес критерия определяется [5, 6]:

$$v_{ij} = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}. \quad (2)$$

Многокритериальная оценка альтернатив [5, 6]:

$$V_j = \sum_{i=1}^n w_i v_{ij} \quad (3)$$

где V_j – показатель качества j -й альтернативы; w_i – вес i -го критерия; v_{ij} – вес j -й альтернативы по i -му критерию.

Результаты оценки альтернатив приведены в табл. 4.

Таблица 4. Приоритеты альтернатив

Альтернатива	A1	A2	A3	A4	A5	Максимальный приоритет
Приоритет	0,4055	0,1055	0,1359	0,1087	0,2442	0,4055

В результате наилучшей альтернативой по методу МАИ является альтернатива A1 – строительство тепловой электростанции.

Литература

1. **Игнатьев И.В., Шакиров В.А.** Многокритериальный анализ вариантов размещения энергетических объектов / М-во образования и науки РФ, ФГБОУ ВПО "Братский гос. ун-т". Братск, 2011. – 144 с.
2. **Шакиров В.А., Ноговицын Д.Д., Ефимов А.С., Шеина З.М., Сергеева Л.П.** Анализ эффективности использования энергии ветра в северных районах республики Саха (Якутия) // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 935.
3. **Шакиров В.А., Панкратьев П.С.** Многокритериальный двухуровневый подход к выбору лучшей альтернативы в рамках слабоструктурированной проблемы // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2013. № 2. С. 118-127.
4. **Шакиров В.А., Фадеев В.А.** Модель анализа развития генерирующих мощностей с использованием нечеткого вывода // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 18. № 22 (125). С. 90–96.
5. **Шакиров В.А., Панкратьев П.С.** Выбор пункта строительства электростанции в условиях риска методом анализа иерархий // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 4 (44). С. 141-147.
6. **Петровский А.Б.** Теория принятия решений: учебник для студ. Высш. учеб. заведений / - М. : Издательский центр «Академия», 2009. – 400с.

УДК 621.311.226: 621.313.333

Г.Г. ОРЛОВ¹, к.т.н., профессор,
М.Ю. ЗОРИН², к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

E-mail: Gennadiy.Orl.ru@gmail.com¹, zorin@ivenser.com²

Выбор оптимальной схемы деаэрации воды для ПГУ-325

Аннотация: разработана методика комплексного подхода к термодинамической оценке различных схем деаэрирования питательной воды для утилизационных ПГУ. Показано, что наиболее оптимальной является схема с деаэрацией воды распылительной головкой, установленной в барабане низкого давления котла-утилизатора ПГУ.

Ключевые слова: деаэратор, котел-утилизатор, газовая турбина, паровая турбина, схема.

G.G. ORLOV, Candidate of Technical Sciences, professor,
M.Y. ZORIN, Candidate of Technical Sciences, assistant professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003Ю Иваново, Rabfakovskaya St., 34

E-mail: Gennadiy.Orl.ru@gmail.com¹, zorin@ivenser.com²

Selection of the optimal scheme of de-aeration of water for PGU-325

Abstract: the technique of an integrated approach to the thermodynamic evaluation of various schemes deaerating feedwater for utilizing UCG. It is shown that the optimal scheme is a de-aeration of water spray head mounted in the drum of the recovery boiler PSU low pressure.

Key words: a deaerator, a heat recovery boiler, a gas turbine, a steam turbine, circuit.

В настоящее время отечественная и зарубежная энергетика активно развивается по пути создания утилизационных парогазовых установок (ПГУ). Главными преимуществами таких ПГУ по сравнению с традиционными паротурбинными установками (ПТУ) являются: высокая экономичность ($\text{КПД}_{\text{ПГУ}} = 52\text{--}55\%$); малые капитальные вложения; меньшая потребность в охлаждающей воде; низкие вредные выбросы; высокая маневренность. Утилизационные ПГУ требуют установки котлов-утилизаторов (КУ), в которых уходящими газами ГТУ генерируется пар одного или двух давлений для ПТУ. На территории России устанавливаются ГТУ как отечественного, так и зарубежного производства. Эти ГТУ имеют высокие показатели по надежности и экономичности. Котлы-утилизаторы устанавливаются, в основном, отечественного производства.

Паротурбинные подстройки (КУ, ПТУ) к ГТУ имеют более низкие параметры пара в сравнении с традиционными существующими конден-

сационными турбинами. Однако, вопрос предотвращения кислородной коррозии металла остается актуальным и для них.

Кислородная коррозия металла трубопроводов и оборудования (КУ, ПТУ) является наиболее опасной, так как она проявляется в виде язвин и может привести к выходу оборудования из строя. Чтобы устранить это явление, необходимо осуществить процесс удаления из воды растворенных в ней агрессивных газов. Наибольшее распространение получил термический способ деаэрации воды, в котором растворимость в воде газов с повышением ее температуры уменьшается, а при температуре, равной температуре кипения, агрессивные газы почти полностью удаляются из воды. Их содержание в воде после деаэрации не превышает 7-10 мкг/л. Система регенерации в тепловой схеме ПГУ упрощена, поэтому перед нами встал ряд вопросов: какая система деаэрации питательной воды будет самой эффективной и рациональной, к какому отбору паровой турбины подключить деаэратор и какое давление поддерживать в нем?

Для ПГУ-325 нами были рассмотрены семь вариантов деаэрации воды в тепловой схеме:

1. установлен деаэратор Д-0,02 МПа, из которого вода насосом подается в барабаны высокого (БВД) и низкого давления (БНД) КУ; а сепарат ЦВД сливается в конденсатор паровой турбины;

2. установлен тот же Д-0,02 МПа, а сепарат ЦВД идет в него;

3. установлен деаэратор Д-0,12 МПа, а сепарат ЦВД паровой турбины идет в конденсатор;

4. применен Д-0,02 МПа с одним питательным насосом (ПН) для БНД, а сепарат ЦВД поступает в конденсатор; второй ПН после БНД подает воду в БВД;

5. та же схема 4, но сепарат ЦВД идет в деаэратор;

6. установлен деаэратор Д-0,12 МПа; слив сепарата ЦВД направлен в Д-0,12 МПа, который имеет один ПН; второй ПН подает воду из БНД в БВД;

7. деаэрация воды осуществляется в барабане низкого давления специальной головкой распылительного типа.

Из проведенных расчетов было получено, что схема ПГУ-325 по варианту 5 (рис. 1) имеет наивысший КПД ($\eta_{\text{пгу}}=52,16\%$) из рассмотренных с первой по шестую схем с деаэратором. Самой лучшей оказывается схема с деаэрацией воды в барабане НД котла КУ. КПД достигает $\eta_{\text{пгу}}=53,015\%$ (рис. 2).

Специальная распылительная головка в БНД может быть расположена в любом месте барабана. Таким образом, ввиду значительно большего преимущества в экономичности наиболее целесообразно применять деаэрацию воды по варианту 7 (рис. 2).

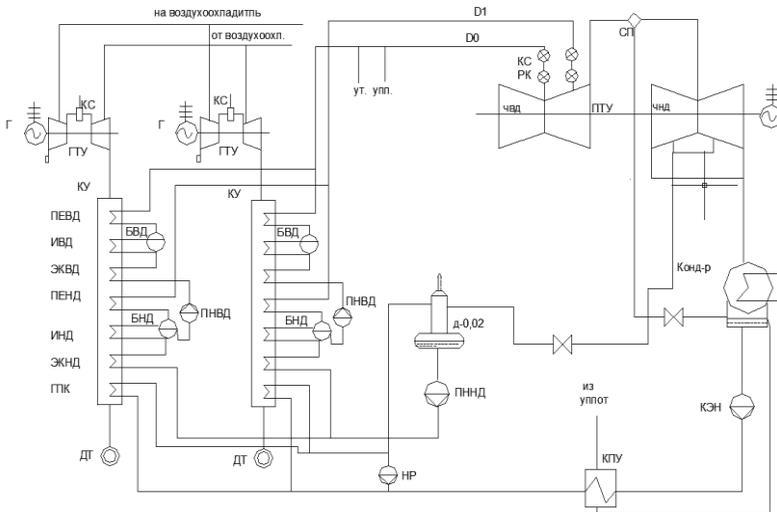


Рис. 1. Тепловая схема ПГУ (схема "связанная" с деаэратором Д-0,02 МПа и сливом дренажа из сепаратора в конденсатор)

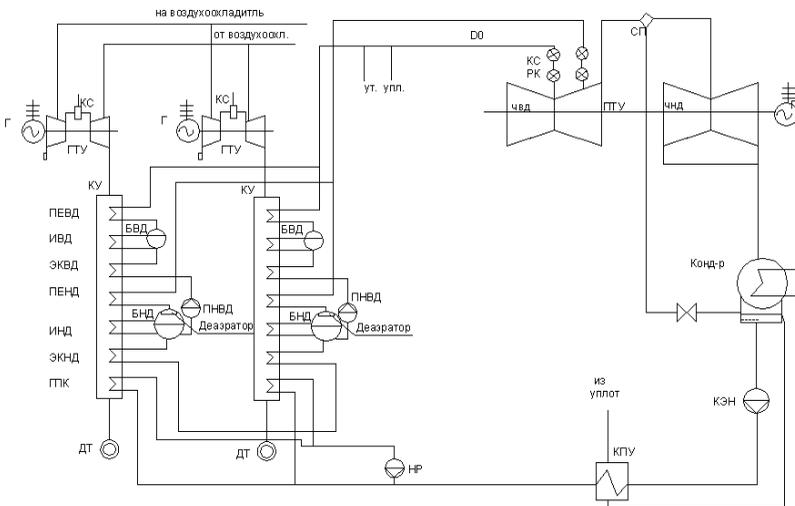


Рис. 2. Тепловая схема ПГУ-325 со встроенным в барабан деаэратором

УДК 621.311.22: 621.362

Г.Г. ОРЛОВ¹, к.т.н., профессор,
К.А. КАСАТКИН², студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: Gennadiy.Orl.ru@gmail.com¹; vip_kirill16@mail.ru²

Подпитка пароводяного цикла ТЭС конденсатом влаги из дымовых газов

Аннотация: в работе представлена схема для конденсации водяных паров из дымовых газов ТЭС; рассмотрена методика расчёта основных параметров и характеристик этой схемы; разработана программа в среде программирования Delphi для ПЭВМ, позволяющая рассчитать схему.

Ключевые слова: энергосбережение, конденсат, испаритель, дымовые газы.

G.G. ORLOV, Candidate of Engineering, professor,
K.A. KASATKIN, student

Ivanovo State Power University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: Gennadiy.Orl.ru@gmail.com¹; vip_kirill16@mail.ru²

Feeding steam-water cycle of thermal power plants with condensation from the flue gases

Abstract. The paper presents a scheme for the condensation of water vapor from the flue gases of thermal power plants; the method of calculation of the main parameters and characteristics of this scheme; developed a program in the programming environment Delphi for a PC to allowing calculate the scheme.

Key words: energy saving, condensate, evaporator, flue gases.

В настоящее время большое внимание в России и мире уделяется вопросам охраны окружающей среды и созданию высокоэкономичных энергетических установок с минимальным выбросом вредных веществ в окружающую среду.

При сжигании на ТЭС природного газа, который представляет собой комплекс углеводородов, в уходящих дымовых газах будут содержаться только окислы углерода и водяные пары. Поэтому при использовании на ТЭС и других отраслях промышленности газового топлива возникает возможность сокращения таких выбросов за счёт осуществления следующих мероприятий:

- получение из уходящих дымовых газов ТЭС двуокиси углерода в виде сухого льда;
- получение конденсата из водяных паров в уходящих дымовых газах для компенсации утечек пара и воды в цикле ТЭС.

Реализации второй задачи и посвящена данная работа.

Действительный объём водяных паров V_{H_2O} , образующихся при сжигании 1 м^3 природного газа с начальным влагосодержанием $d_{г.тп}$, определяется по выражению

$$V_{H_2O} = 0,01 \cdot [H_2S + H_2 + \sum_2^n C_m H_n + 0,124d_{г.тп}] + 0,0161 \cdot V^0,$$

где H_2S , H_2 , $C_m H_n$ – компоненты газового топлива в %; V^0 – теоретический объём воздуха, расходуемый на 1 м^3 сжигаемого газового топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$; значение V^0 определяется по общеизвестному выражению для процесса сжигания 1 м^3 газового топлива.

Чтобы определить общее количество влаги W_{H_2O} , содержащейся в уходящих дымовых газах после котельного агрегата, необходимо найти массовую долю водяных паров m_{H_2O} , используя их объёмную долю r_{H_2O} и молекулярный вес μ_{H_2O} , молекулярный вес уходящих дымовых газов $\mu_{yx.g}$, удельную массу дымовых газов G_r , $\text{кг}/\text{м}^3$ и расход сжигаемого в котельном агрегате натурального топлива $B_{нат}$, $\text{м}^3/\text{ч}$:

$$W_{H_2O} = \frac{r_{H_2O} \cdot \mu_{H_2O}}{\mu_{yx.g}} \cdot \left(\rho_{г.тп}^c + \frac{d_{г.тп}}{1000} + 1,306 \cdot \Delta\alpha \cdot V^0 \right) \cdot B_{нат} \cdot 10^{-3},$$

где $\rho_{г.тп}^c$ – плотность сухого газового топлива, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\Delta\alpha$ – присосы воздуха в котельный агрегат по его тракту.

Зная общее количество влаги W_{H_2O} , содержащиеся в уходящих газах легко определить удельное влагосодержание на 1 кг сухих уходящих газов, равное, $\text{кг}/\text{кг}$ с.г.:

$$d = \frac{G_{H_2O}}{G_r - G_{H_2O}} = \frac{m_{H_2O} \cdot G_r}{G_r - m_{H_2O} \cdot G_r} = \frac{m_{H_2O}}{1 - m_{H_2O}},$$

где G_{H_2O} - вес водяных паров, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Задаваясь величиной подпитки цикла паротурбинного блока ТЭС $D_{подп}$, равной утечкам $D_{ут}$, определяем удельное влагосодержание уходящих газов после контактного теплообменника в предлагаемой нами установке (рис. 1), $\text{кг}/\text{кг}$ с.г.:

$$d_i = d - \frac{1000 \cdot D_{ут}}{G_r - m_{H_2O} \cdot G_r},$$

где $D_{ут}$ – величина утечек в цикле, которую компенсируют конденсатом из уходящих дымовых газов, $\text{т}/\text{ч}$.

На рис. 1 представлена предлагаемая нами установка для получения обессоленной воды из уходящих дымовых газов ТЭС. Уходящие дымовые газы котельного агрегата поступают в контактный теплообменник, в котором за счёт впрыска относительно холодной воды происходит конденсация водяных паров, содержащихся в дымовых газах.

При этом удельное влагосодержание дымовых газов падает со значения d до d_1 . Вода, впрыскиваемая в контактный теплообменник, циркулирует по замкнутому контуру: контактный теплообменник – вакуумный испаритель. Конденсат из дымовых газов, который в контактном теплообменнике соединился с циркуляционным потоком, выделяется из этого потока в вакуумном испарителе и далее направляется в ПНД системы регенерации, а далее в конденсатор турбины. На блочной обессоливающей установке происходит доочистка конденсата до требуемых норм.

Для проведения расчетов по определению основных параметров предлагаемой нами установки нами была разработана программа в среде программирования Delphi. Данная программа позволяет определить количество выделяемой влаги, площадь теплообмена поверхностных теплообменников, параметры газов, воды и пара на разных участках схемы, затраты электроэнергии на собственные нужды, срок окупаемости и чисто дисконтированный доход от использования этой установки. В итоге формируется расчетная схема установки (рис. 1).

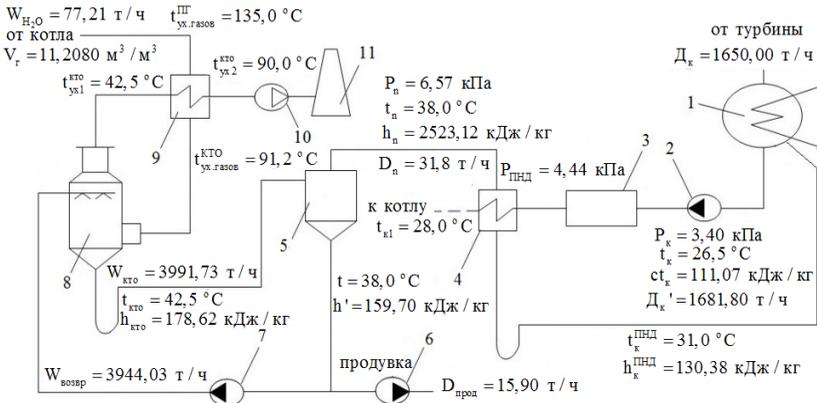


Рис. 1. Установка для получения конденсата из уходящих дымовых газов ТЭС для компенсации утечек в цикле:

- 1 – конденсатор; 2 – конденсатный насос; 3 – блочная обессоливающая установка; 4 – подогреватель низкого давления; 5 – вакуумный испаритель;
- 6 – продувочный насос; 7 – циркуляционный насос;
- 8 – контактный теплообменник; 9 – подогреватель уходящих газов из контактного теплообменника; 10 – дымосос; 11 – дымовая труба.

В расчёте на блок 800 МВт с турбиной К-800-240-5 срок окупаемости установки составил 0,27 лет, а чисто дисконтированный доход равен 448743,62 руб, также затраты на собственные нужды составили 276 кВт.

УДК 621.311.22: 621.313.333

Г.Г. ОРЛОВ¹, к.т.н., профессор,
А.А. КЛЮШКИН², студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: Gennadiy.Orl.ru@gmail.com¹ sanya18.02.95@yandex.ru²,

Восполнение утечек в цикле ТЭС конденсатом выпара топливных сушилок

Аннотация: предложена схема компенсации утечек в цикле ТЭС конденсатом выпара топливных сушилок. Разработана методика и программа для ПЭВМ по расчету предлагаемой схемы. Компенсация утечек цикла ТЭС конденсатом выпара топливных сушилок позволяет отказаться от химводоочистки.

Ключевые слова: контактный теплообменник, вакуумный испаритель, сушилка, конденсат, утечки.

G.G.ORLOV Candidate of Technical Sciences, professor,
A.A. KLYUSHKIN student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

E-mail: Gennadiy.Orl.ru@gmail.com¹ sanya18.02.95@yandex.ru²,

Replenishment of leakages in the cycle of TES condensate flash steam to the fuel dryers

Abstract. The proposed scheme for compensation of leaks in the cycle thermal power plant condensate flash steam to fuel dryers. Developed methodology and computer program for the calculation of the proposed scheme. Compensation of leakage cycle thermal power plant condensate flash steam to the fuel dryers allows to refuse from chemical water treatment.

Key words: contact heat exchanger, a vacuum evaporator, dryer, condensation, leaks.

При использовании на электростанциях влажного топлива иногда осуществляют его предварительную подсушку перед сжиганием в котельном агрегате. Обычно бурые угли подсушивают с начальной влажности 30-39% до влажности 12-14%, а каменные угли с влажности 8-12% до влажности 1-2%.

Благодаря удалению влаги улучшается сыпучесть угля, повышается его теплотворная способность, транспорт угля становится надежнее, улучшаются условия его размола, повышается производительность мельниц, а сжигание топлива происходит более устойчиво. Повышение теплотворной способности топлива позволяет выполнить котельный агрегат компактным.

На рис. 1 представлена предлагаемая нами схема компенсации утечек в цикле ТЭС конденсатом выпара топливных сушилок, которая

работает следующим образом. Ленточный конвейер 7 подает влажное топливо в бункер 8, из которого оно поступает в паровую трубчатую сушилку топлива 1, после которой ссыпается в бункер сухого угля 9 и далее поступает к мельницам на размол.

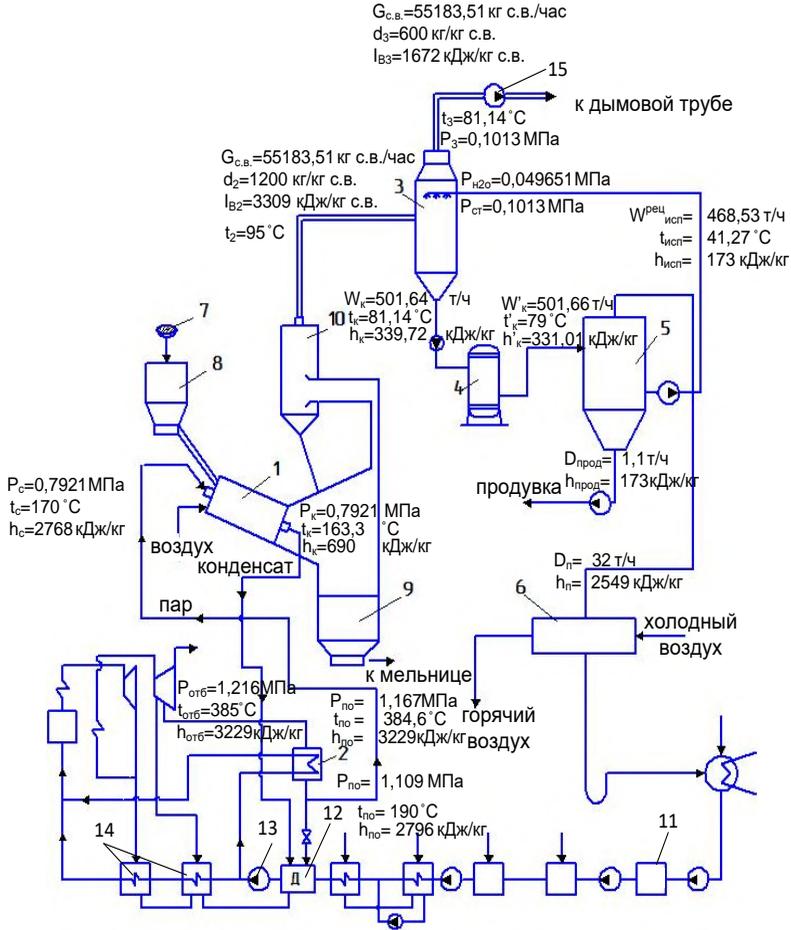


Рис.1. Схема компенсации утечек ТЭС конденсатом водяных паров из подсушенного топлива:

- 1 – паровая трубчатая сушилка; 2 – парохладитель для пара, идущего на сушку топлива; 3 – контактный теплообменник; 4 – механический фильтр;
- 5 – вакуумный испаритель; 6 – калорифер котла; 7 – транспортер угля;
- 8 – бункер сырого угля; 9 – бункер сухого угля; 10 – циклон;
- 11 – блочная обессоливающая установка; 12 – деаэратор; 13 – ПН; 14 – ПВД;
- 15- вентилятор отсоса воздуха из сушилок

Паровая трубчатая сушилка 1 представляет собой вращающийся наклонно установленный (под углом 8-12°) цилиндрический барабан, в трубные доски которого ввальцованы трубы для угля.

При помощи специального устройства в трубы загружается предназначенное для подсушки топливо, которое за счет вращения сушилки постепенно проходит по трубам, соприкасаясь при этом с горячей поверхностью их стенок, обогреваемых паром, подаваемым в межтрубное пространство сушилки [1].

Через полую цапфу пар из отбора турбины, после пароохладителя 2 подается в сушилку 1 и обогревает трубы. Конденсат этого пара из сушилок поступает в деаэратор 12.

Паровые трубчатые сушилки изготавливаются диаметром барабана 2,4-3,6 м и длиной 7-8 м. Число труб от 240 до 1400 штук.

Воздух из помещения ТЭС засасывается в трубы сушилки с помощью отсосного вентилятора 15 через их открытые передние торцы и проходит по трубам в том же направлении, что и топливо.

При работе сушилки воздух нагревается от соприкосновения с горячей поверхностью труб и одновременно поглощает выделяющиеся из топлива водяные пары. После сушилок воздух проходит циклон 10 и подается в контактный теплообменник 3.

В теплообменник 3 впрыскивается вода, циркулирующая по замкнутому контуру: контактный теплообменник 3 - механические фильтры 4 - вакуумный испаритель 5.

За счет этой циркулирующей воды в контактном теплообменнике 3 частично конденсируются водяные пары, выделенные из влажного топлива в сушилке 1. Циркуляционный поток вместе с конденсатом сушилок поступает в вакуумный испаритель 5, где происходит вскипание поступающей воды и образование пара, используемого после конденсации для компенсации утечек в цикле ТЭС.

Для поддержания качества образующегося в испарителе пара предусмотрена продувка испарителя. Образовавшийся в испарителе 5 пар может поступать на калориферы котельного агрегата 6 или на регенеративный подогреватель низкого давления тепловой схемы блока, где он конденсируется и поступает в конденсатор турбины на компенсацию утечек.

Нами была просчитана предлагаемая схема применительно к блоку с турбиной К-500-24,5-4. Результаты расчета показаны на каждом элементе предлагаемой схемы (рис.1).

Анализ схемы показал, что количество конденсата, поступающего на компенсацию утечек цикла, составляет 32 т/ч или 2% от расхода пара на турбину, что соответствует требуемым нормам подпитки цикла. Срок окупаемости предлагаемой схемы оказывается менее двух лет, кроме того значительно сокращаются затраты на химводоочистку ТЭС.

Литература

1. **Михайлов Н. М.** Вопросы сушки топлива на электростанциях М.-Л. «Госэнергоиздат». 1957.-152 с.

УДК 621.311.22: 621.313.333

Г.Г. ОРЛОВ¹, к.т.н., профессор,
А.А. КЛЮШКИН², А.Д. СКУРИХИНА³, студенты

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: Gennadiy.Orl.ru@gmail.com¹, sanya18.02.95@yandex.ru²,
skurikhina.ad@yandex.ru³

Повышение экономичности ТЭС с паровой подсушкой высоковлажных бурых углей

Аннотация: для повышения экономичности ТЭС с паровой подсушкой топлива предлагается установить пароохладитель на отборе пара из турбины к топливным сушилкам, что позволяет получить требуемую температуру пара на входе в сушилки и повысить температуру питательной воды на входе в котельный агрегат.

Ключевые слова: подогреватель, бурый уголь, пароохладитель, сушилка, утечки, мощность турбоустановки, экономия топлива.

G.G.ORLOV, Candidate of Technical Sciences, professor,
A.A. KLYUSHKIN, A.D. SKURIKHINA, students
Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: Gennadiy.Orl.ru@gmail.com¹, sanya18.02.95@yandex.ru²,
skurikhina.ad@yandex.ru³

Improving the efficiency of thermal power plants with steam drying high-moisture brown coals

Abstract: to improve the efficiency of thermal power plants with steam drying fuel is proposed to install a desuperheater in the steam extraction from the turbine to the fuel dryer, which allows to obtain the desired steam temperature at the inlet to the dryer to raise the temperature of feed water at the inlet to the boiler unit.

Key words: heater, brown coal, desuperheater, dryer, leak, power turbine, fuel economy.

В России сосредоточено более трети общемировых запасов угля, из которых 70 % приходится на долю бурого угля. По добыче угля (370 млн. т/год) Россия занимает пятое место в мире.

В целях повышения экономичности ТЭС, сжигающих низкосортные бурые угли, имеющие влажность $W^P = 30 - 39\%$ и теплотворную способность $Q_{HP} = 11,7 - 13$ МДж/кг, иногда осуществляют подсушку такого топлива в паровых сушилках перед его сжиганием, при этом W^P снижается до 12–14 %, Q_{HP} повышается до 2–22 МДж/кг, а котельный агрегат становится более компактным.

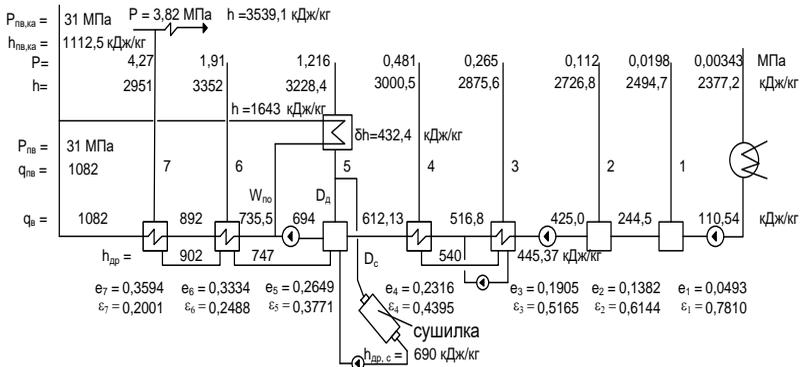
При паровой подсушке угля в трубчатых сушилках, температура пара на входе в сушилки не должна превышать 170 °С, что связано с

работой подшипников сушилки. Однако пар, отбираемый на сушику топлива из регенеративного отбора турбины, является перегретым и его температура значительно выше требуемой. Для снижения температуры пара на входе в сушилки обычно в него впрыскивают воду.

В настоящей работе предлагается реализовать более рациональную схему охлаждения пара, идущего к сушилкам (рис.1), пропуская его через специальный вынесенный пароохладитель (ПО), в котором сьем теплоты перегрева пара осуществляется за счет нагрева части потока питательной воды, забираемой после питательного насоса (ПН).

Отбираемый на ПО поток воды не проходит через подогреватели высокого давления (ПВД), что позволяет сократить расходы пара на ПВД и получить дополнительную выработку мощности в турбине. Отбор пара на сушику топлива значителен, и чтобы сохранить требуемую мощность на клеммах генератора обычно убирают первый ПВД.

Эффективность установки ПО оценим используя метод коэффициентов изменения мощности ϵ [1]. Коэффициенты ϵ , КПД цикла η и коэффициенты выработки энергии на тепловом потреблении: $\epsilon = (\eta - \epsilon)/(1 - \eta)$, применительно к турбоустановке К-500-23,54-4, даны на рис.1.



$D_0 = 444,45 \text{ кг/с}$; $P_0 = 23,54 \text{ МПа}$; $t_0 = 540 \text{ }^\circ\text{C}$; $h_0 = 3324 \text{ кДж/кг}$; $\Delta h_{пн} = 588,1 \text{ кДж/кг}$;
 $t_{пн} = 540 \text{ }^\circ\text{C}$; $P_K = 3,43 \text{ кПа}$; $W_{пн} = 23,78 \text{ кг/с}$; $D_c = 25,28 \text{ кг/с}$; $D_d = 24,8 \text{ кг/с}$;
 $\omega_{пн} = W_{пн} / D_0 = 0,0535$; $\eta = 0,4662$.

Рис. 1. Схема регенерации турбоустановки К-500-23,54-4

Поток пара, идущий после ПО в сушилку топлива D_c и деаэратор D_d , поступает в них при сниженной температуре, что приводит к изменению мощности турбоустановки на величину:

$$\Delta N_1 = \epsilon_5 (D_c + D_d) \delta h = 0,3771(25,28 + 24,8) 432,4 = 8165,9 \text{ кВт},$$

где δh – разность энтальпий пара на входе и выходе ПО, кДж/кг; ε_5 – коэффициент выработки энергии на тепловом потреблении для отбора № 5.

Из деаэратора выходит поток питательной воды $W_{пв}$. После ПН из этого потока $W_{пв}$ на ПО отводится вода в количестве $W_{по} = 23,78$ кг/с. Следовательно через вышестоящие ПВД пройдет воды меньше, которое равно $W = W_{пв} - W_{по}$. Для нагрева воды W , проходящей через ПВД, потребуется меньше пара из отборов № 6 и № 7 турбины, что приводит к недовыработке мощности турбоустановкой ΔN_2 :

$$\begin{aligned} \Delta N_2 &= -W_{по} (\varepsilon_6 \Delta q_{в6} + \varepsilon_7 \Delta q_{в7}) = \\ &= -23,78(0,2488 \cdot 156,5 + 0,2 \cdot 190) = -1830 \text{ кВт}, \end{aligned}$$

где $\varepsilon_6, \varepsilon_7$ – коэффициенты выработки энергии на тепловом потреблении для ступеней регенерации № 6 и № 7; $\Delta q_{в6}, \Delta q_{в7}$ – нагрев воды в ступенях регенерации № 6 и № 7, кДж/кг; $W_{по}$ – расход воды на ПО, кг/с.

Полное суммарное изменение мощности турбоустановки равно:

$$\Delta N = \sum_1^2 \Delta N_i = \Delta N_1 + \Delta N_2 = 8165,9 - 1830,0 = 6335,9 \text{ кВт}.$$

Основным условием расчета является постоянство расхода теплоты в конденсатор $Q_k = \text{const}$, поэтому годовая экономия топлива ΔB_1 от установки ПО при числе $\tau_a = 6500$ час, удельном расходе условного топлива на выработку электроэнергии $b_{э}^{усл} = 0,320$ кг/(кВт·ч), КПД котельного агрегата $\eta_{ка} = 0,92$, КПД транспорта теплоты $\eta_{тр} = 0,98$ и дополнительной выработки мощности $\Delta N = 6335,9$ кВт составит

$$\begin{aligned} \Delta B_1 &= -\Delta N \cdot \tau_a \left(b_{э}^{усл} - \frac{3600}{\eta' \cdot \eta_{ка} \cdot \eta_{тр} \cdot Q_{усл}} \right) \cdot 10^{-3} = \\ &= -6335,9 \cdot 6500 \left(0,320 - \frac{3600}{1,0 \cdot 0,92 \cdot 0,98 \cdot 29308} \right) \cdot 10^{-3} = -7567,8 \frac{\text{т.у.т.}}{\text{г}}, \end{aligned}$$

где знак минус (–) означает экономию топлива.

Прирост температуры питательной воды на входе в котел $\Delta t_{пв} = 6,6$ °С, вызванный установкой ПО для пара, идущего на сушку топлива, приводит к увеличению потерь теплоты с уходящими газами q_2 на величину $\delta q_2 = 0,012 \cdot \Delta t_{пв}$, % и, следовательно, к снижению КПД $\eta_{к.а}$ и пережогу топлива на ТЭС на величину $\Delta B_2 = 823,7$ т.у.т./г, а действительная экономия топлива от установки ПО для пара, отбираемого на сушку топлива и в схему регенерации турбоустановки, составит

$$\Delta B = -\Delta B_1 + \Delta B_2 = -7567,8 + 823,7 = -6744,1 \frac{\text{т.у.т.}}{\text{г}}.$$

Таким образом, установка ПО полностью оправдывается.

Литература

1. Рубинштейн Я.М., Щепетильников М.И. Исследование реальных тепловых схем ТЭС и АЭС. – М.: Энергоиздат. 1982. – С. 271.

УДК 621.321

И.М. ЧУХИН, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: chuhin@tot.ispu.ru

Оптимизация параметров рабочих тел ГТУ в составе АЭС на насыщенном паре

Аннотация. Разработана методика оптимизации параметров рабочих тел ГТУ в составе АЭС на насыщенном водяном паре. В методике учитывается температура внешней среды и необратимость адиабатных процессов ГТУ. Приведены примеры термодинамической оптимизации данного цикла.

Ключевые слова: парогазовая установка, тепловая экономичность, параметры рабочих тел.

I.M. CHUHIN Candidate of Engineering, docent
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: chuhin@tot.ispu.ru

Optimization of parameters of GTU working bodies in NPP structure on saturated steam

Abstract. A technique for optimizing the parameters of GTU working bodies in the nuclear power plant on a saturated water vapor has been developed. The method takes into account the temperature of the external environment and the irreversibility of the adiabatic processes of the gas turbine. Examples of thermodynamic optimization of this cycle are given.

Key words: combined cycle plant, the thermal efficiency, the parameters of working bodies.

Объединение цикла газотурбинной установки (ГТУ) и АЭС на насыщенном водяном паре позволяет взаимно компенсировать их основные недостатки [1, 2].

Ранее предложенная автором схема (рис. 1) использования теплоты уходящих из газовой турбины газов для перегрева пара, выходящего из части высокого давления (ЧВД) паровой турбины АЭС и для подогрева питательной воды требует детальной оптимизации параметров рабочего тела ГТУ.

Оценка тепловой экономичности схемы выполнена на примере серийного блока АЭС К-1000-65/3000 ЛМЗ [1]. Температура уходящих газов принималась $t_{4r}=120$ °С. Минимальный перепад температур в газодляном (ГВЛ) и газо-паровом (ГПП) подогревателях принимался в 100 °С.

В данной работе представлены результаты оптимизации параметров рабочего тела ГТУ в составе данной схемы при температуре газов перед турбиной $t_{3r}=1000$ °С и изменении температуры внешней среды от $t_{1r}=-20$ °С до $t_{1r}=20$ °С. Для ГТУ приняты адиабатный коэффициент компрессора $\eta_k = 0,85$ и внутренний относительный КПД газовой турбины

ны $\eta_{ГТ} = 0,88$ в базовом расчетном режиме. При других температурах внешней среды $t_{г}$ эти коэффициенты уменьшаются на 0,01 при снижении или повышении температуры на 10 градусов. Величина оптимальной степени повышения давления воздуха в компрессоре $\nu_{опт}$ определялась методом вариантных расчетов с ориентацией на максимальную тепловую экономичность совместной работы ГТУ и АЭС, как по выработке всей полезной электрической мощности, так и по выработке пиковой мощности.

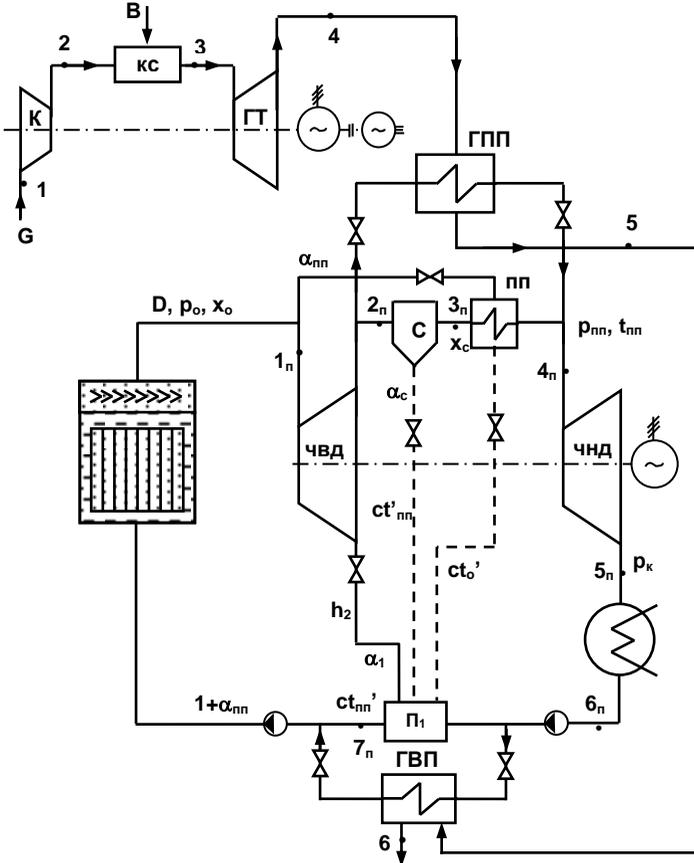


Рис. 1. Схема одноконтурной АЭС на насыщенном водяном паре при совместной работе АЭС с ГТУ:

С – сепаратор, ПП – паро-паровой перегреватель, П1 – регенеративный подогреватель, ГПП – газопаровой перегреватель, ГВП – газовойдяной подогреватель, D – расход пара, G – расход газа

В табл. 1 и 2 представлены результаты оптимизации величины $v_{\text{опт}}$ относительно базовых значений $\eta_k = 0,85$ и $\eta_{\text{ГТ}} = 0,88$ и различных температур наружного воздуха.

Таблица 1. Результаты оптимизации при базовом варианте $t_{\text{Г}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$

$v_{\text{опт}}$	$t_{\text{Г}}, \text{ }^\circ\text{C}$	η_k	$\eta_{\text{ГТ}}$	$d_{\text{Г}}$	l_i , кДж/кг	η_i	$l_{\text{пик}}$, кДж/кг	$\eta_{\text{пик}}$
15	-20	0,81	0,84	4,03	2036	0,404	1185	0,446
13	0	0,83	0,86	3,86	1978	0,4051	1128	0,4524
14	20	0,85	0,88	4,27	2059	0,418	1210	0,476

Таблица 2. Результаты оптимизации при базовом варианте $t_{\text{Г}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$

$v_{\text{опт}}$	$t_{\text{Г}}, \text{ }^\circ\text{C}$	η_k	$\eta_{\text{ГТ}}$	$d_{\text{Г}}$	l_i , кДж/кг	η_i	$l_{\text{пик}}$, кДж/кг	$\eta_{\text{пик}}$
17	-20	0,83	0,86	4,387	2151	0,4130	1300	0,4612
16	-20	0,83	0,86	4,259	2137	0,4128	1286	0,4615
14	0	0,85	0,88	4,275	2173	0,4237	1323	0,4831
13	20	0,83	0,86	3,939	1920	0,4037	1069	0,4517
12	20	0,83	0,86	3,791	1909	0,4036	1058	0,4520

В таблицах приведены: $d_{\text{Г}}$ – относительный расход газа на 1 кг пара в цикле АЭС; l_i – удельная работа всего цикла; $l_{\text{пик}}$ – удельная пиковая работа цикла; два внутренних абсолютных КПД η_i – всего цикла и $\eta_{\text{пик}}$ – КПД цикла по выработке пиковой мощности.

На основании анализа результатов расчетов, приведенных в таблицах, можно сделать следующие выводы:

- оптимальное значение степени повышения давления воздуха в компрессоре для АЭС с ГТУ зависит от температуры наружного воздуха и соответствующих ему базовых коэффициентов η_k и $\eta_{\text{ГТ}}$;
- при учете изменения значений коэффициентов η_k и $\eta_{\text{ГТ}}$ (табл. 1 и 2) величина $v_{\text{опт}}$ зависит от температуры наружного воздуха, при котором эти коэффициенты имеют максимальные (базовые) значения, и режима работы АЭС с ГТУ (базовый или пиковый). Например, при $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ в табл. 1 $v_{\text{опт}} = 15$, а в табл. 2 $v_{\text{опт}} = 17$ для базового режима и $v_{\text{опт}} = 16$ для пикового режима.

Литература

1. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции. – М.: Высшая школа, 1984 – 304 с.
2. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки электростанций. Учебн. пособие для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2002, 584 с.

УДК 621.311.22

Б.Л. ШЕЛЫГИН¹, к.т.н., профессор,
М.М. СОЛОВЬЕВ, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Определение оптимального значения коэффициента избытка воздуха за ГТУ-6П для проектных условий эксплуатации котла-утилизатора «П-102»

Аннотация: определяется оптимальное значение коэффициента избытка воздуха за ГТУ $\alpha_{\text{ГТУ}}$ для проектных условий эксплуатации котла-утилизатора (КУ). Получена зависимость изменения суммарного расхода теплоты от $\alpha_{\text{ГТУ}}$.

Ключевые слова: котел-утилизатор, газотурбинная установка, коэффициент избытка воздуха за ГТУ.

B.L. SHELYGIN, candidate of Engineering, professor,
M.M. SOLOVYEV, graduate student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st.34
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Determination of the optimal value of the excess air factor beyond GTU-6P for design conditions of operation of the recovery boiler «P-102»

Annotation: optimal value of the excess air factor behind the GTU is determined for the design conditions of operation of the recovery boiler (RB). The dependence of the change in the total heat consumption from α_{GTU} .

Key words: recovery boiler, gas turbine unit, air excess ratio over GTU.

При работе энергоустановки «ГТУ-6П, П-102» в проектных условиях вырабатывается электрическая мощность $N_3=6$ МВт, пар низкого давления ($p_p=6\div 7$ атм, $t_p=230\div 240$ °С), сетевая вода ($t_{c,v}=70\div 100$ °С).

На величину паропроизводительности КУ влияют расход и температура газов за ГТУ. Отмеченные характеристики зависят от используемого в качестве окислителя расхода уходящих из ГТУ газов при соответствующем $\alpha_{\text{ГТУ}}$.

При работе КУ «П-102» в режиме утилизации уходящих из ГТЭ-6П газов паропроизводительность КУ не превышает $D_p=20$ т/ч. Достижение значений, близких к проектным ($D_n=40\div 50$ т/ч), обеспечивается за счет тепловыделения в его топочной камере при сжигании дополнительного топлива в потоке уходящих из ГТУ газов.

На основании [1] по условию достижения полноты сгорания топлива минимальная концентрация кислорода в газах $O_2^{\text{MIN}}=13,4 - 14,1\%$, по-

этому согласно техническим условиям [3], данным [2] и предыдущим расчетным исследованиям в настоящей работе минимальное значение $\alpha''_{ГТУ}$ принято равным 3,85.

В режиме утилизации теплоты ГТУ для «П-102» низкого давления ($p=7$ ата) основная роль в парообразовании принадлежит теплообмену в конвективном испарительном пакете, зависящему от расхода уходящих газов из ГТУ. Одновременно расход окислителя дополнительно сжигаемого топлива с целью полноты его сгорания возрастает с повышением расхода газов из ГТУ-6П.

Поэтому, важно было определить оптимальное значение $\alpha''_{ГТУ}$, обеспечивающее отмеченные требования. В качестве исходного (базового) значения принята минимальная величина $\alpha''_{ГТУ}=3,85$. В ходе анализа варианты расчеты выполнялись при 5 значениях $\alpha''_{ГТУ}$ и их последовательном повышении в пределах 3,85÷4,05.

В ходе анализа расчеты выполнялись при постоянном расходе топлива в КС $V_{утил}=2,398 \cdot 10^3$ м³/ч. В случае повышения $\alpha''_{ГТУ}$ выше 3,85 снижается температура газов перед ГТЭ-6П, снижается электрическая мощность (ниже 60 МВт) и снижается расход теплоты на ее выработку $Q_{ген}$.

При выполнении вариантных расчетов с повышением $\alpha''_{ГТУ}$ значение $Q_{ген}$ снижается ниже 1464 ккал/с и обеспечивается постоянство температуры $t_{п}=235$ °С.

Применительно к снижению $Q_{ген}$ одновременно значения расхода питательной воды $D_{п.в.}$ и расхода пара $D_{пе}$ изменялись таким образом, чтобы температура насыщенного пара (за барабаном) на входе в радиационный пароперегреватель ПЕ оставалась постоянной $t_{нас}=178$ °С.

При конечной энтальпии пара процесса технологического производства $i_{к}=110$ ккал/кг изменение энергозатрат на текстильном предприятии, ккал/с:

$$\Delta Q_{п.р} = \frac{\Delta D_{пе} \cdot (i_{пе} - 110) \cdot 1000}{3600} = 0,278 \cdot \Delta D_{пе} \cdot (i_{пе} - 110) = 163,5 \cdot \Delta D_{пе},$$

где $\Delta D_{пе}$ – изменение расхода пара по сравнению с базовым вариантом, т/ч; $i_{пе} = 698$ ккал/кг – энтальпия пара при $t_{пе} = 235$ °С.

По результатам вариантных расчетов значения температур перед газовой турбиной и перед КУ в зависимости от $\alpha''_{ГТУ}$ рассчитывается по формулам:

$$g'_{ГТ} = 842 + 185 \cdot (4,05 - \alpha''_{ГТУ})^{1,04},$$

$$g'_{ЕО} = 464 + 90 \cdot (4,05 - \alpha''_{АО})^{1,02}.$$

Результаты вариантных расчетов представлены в табл. 1.

В ходе расчетного исследования по условию обеспечения минимально допустимой концентрации кислорода в газах 13,5% [1] величина $\alpha''_{ГТУ} = 3,93$.

Таблица 1. Результаты вариантных расчетов

Наименование характеристик	Значения коэффициента $\alpha''_{ГТУ}$					
	3,85	3,9	3,93	3,95	4,00	4,05
Расход теплоты на выработку электроэнергии $Q_{ГЕН}$, ккал/с	1462	1461	1460	1459	1455	1451
Изменение расхода теплоты на выработку электрической мощности $\Delta Q_{ГЕН} = Q_{ГЕН} - Q_{ГЕН}^0$	-	-1	-2	-3	-6	-11
Расход пара $D_{ПЕ}$, т/ч	16,45	16,53	16,55	16,42	16,31	16,21
Расход газов $G_{Г}$, $нм^3/с$	25,38	25,7	25,9	26,02	26,34	26,66
Температура газов перед ГТ $\vartheta'_{ГТ}$, °С	877	868	863	859	850	842
Температура газов перед КУ $\vartheta'_{КУ}$, °С	482	477	475	473	468	464
Температура уходящих газов $\vartheta_{УХ}$, °С	103	102	102	102	103	103
$\Delta Q_{ПЕ} = 163 \cdot \Delta D_{ПЕ}$	-	10,2	13,4	4,2	-22,8	-38,9
$\Delta Q_{ГЕН} + \Delta Q_{ПЕ}$	-	9,2	11,4	1,2	-28,8	-49,9

$\Delta Q_{ГЕН} + \Delta Q_{ПЕ}$

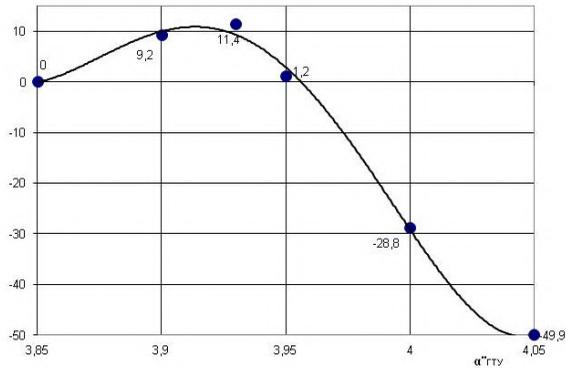


Рис. 1. Зависимость изменения суммарного расхода теплоты от $\alpha''_{ГТУ}$

Литература:

1. **Цанев, С.В.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электрических станций: учеб. пособие для вузов/ С.В. Цанев, В.Д. Буров, А.Н. Ремезов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2006. - 580 с.
2. **Шельгин, Б.Л.** Режимы работы котлов-утилизаторов в составе ПГУ электростанций: Учебное пособие, издание 2-е, переработанное и дополненное / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2015. – 128 с.
3. **ГОСТ 29328-92.** Установки газотурбинные для привода турбогенераторов. Общие технические условия. – Введ. 1993-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1992. - 10 с.

УДК 621.311.22

Б.Л. ШЕЛЫГИН¹, к.т.н., профессор,
А.Д. ХВОСТОВ, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: admin@tes.ispu.ru¹

Определение оптимального значения коэффициента избытка воздуха за ГТЭ-110 при проектном режиме работы ПГУ-325

Аннотация. Выполнено расчетное исследование по определению оптимального значения коэффициента избытка воздуха за ГТУ при проектном режиме работы ГТУ-325. Получена зависимость изменения суммарного расхода теплоты от $\alpha_{\text{ГТУ}}$.

Ключевые слова: Котел-утилизатор, коэффициент избытка воздуха в газах, газотурбинная установка, расход теплоты.

B.L. SHELYGIN, candidate of Engineering, professor,
A.D. KHVOSTOV, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya st.34
E-mail: admin@tes.ispu.ru¹

Determination of the optimum value of the excess air factor for GTE-110 at the design mode of operation of PGU-325

Annotation. A computational study to determine the optimal value of the excess air factor for GTU under the project mode of operation of GTU-325. The dependence of the change in the total flow rate in the flowing part of the steam turbine is obtained from α_{GTU} .

Keywords: recovery boiler, air excess ratio, gas turbine unit, heat consumption.

Энергоустановка ПГУ-325 вырабатывает электрическую энергию газотурбинной установкой ГТЭ-110 и паровой турбиной (ПТ) К-110-6,5. Последняя потребляет пар от котла-утилизатора (КУ) «П-88», являющегося пассивным элементом ПГУ. Условия и особенности его работы определяются режимом эксплуатации ГТУ.

На величину выработанной мощности энергоустановки влияют значения температур газов на входе в ГТ, КУ и расхода газов через них. Определяемые характеристики зависят от расходов сжигаемого в камере сгорания (КС) ГТ топлива и подаваемого окислителя при соответствующем коэффициенте избытка воздуха за ГТУ $\alpha_{\text{ГТУ}}$.

Согласно техническим условиям [1], данным [2] при расходе газов $G = 360$ кг/с и их средней плотности $\rho_{\text{ср}} = 1,36-1,37$ кг/м³ в качестве исход-

ного(базового) значения $\alpha''_{ГТУ}$ принята максимальная величина, равная 3,07.

При снижении $\alpha''_{ГТУ}$ с изменением расхода и температуры газов за ГТУ увеличивается количество теплоты, поступающее в газоход КУ на выработку пара в контурах высокого и низкого давлений (ВД, НД).

В ходе анализа важным являлось определение $\alpha''_{ГТУ}$ когда:

- достигается максимальное значение электрической мощности, суммарно вырабатываемой в ГТУ и ПТУ;

- температура пара ВД не превышает ранее установленного значения $t_{ВД} = 498-499^\circ\text{C}$;

- температура пара НД остается на неизменном уровне $t_{НД} = 229-230^\circ\text{C}$.

Анализ выполняется с использованием разработанной расчетной модели КУ «П-88» [3] на основании программного продукта «ТРАКТ».

Расчетное исследование проводилось при неизменном расходе топлива $V_T = 31,93 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{час}$ и снижении $\alpha''_{ГТУ}$ от 3,07 до 2,77.

В случае снижения величины $\alpha''_{ГТУ}$ возрастает температура газов за КС ГТУ перед ГТ $\vartheta''_{ГТ}$ при соответственной выработке дополнительной электрической мощности $N_э$. Одновременно возрастает температура газов перед КУ $\vartheta''_{КУ}$, что повышает расход энергии продуктов сгорания $Q_{ген}$ на производство $N_э$. При снижении значения $\alpha''_{ГТУ}$ и с повышением температуры $\vartheta''_{ГТ}$ величина $Q_{ген}$ становилась выше базового значения (26785 ккал/с).

В ходе расчетного анализа при снижении $\alpha''_{ГТУ}$ для обеспечения постоянства $t_{ВД} = 498-499^\circ\text{C}$ и $t_{НД} = 229-230^\circ\text{C}$ величина $D_{ВД}$ должна незначительно возрастать, а $D_{НД}$ заметно снижаться.

По результатам вариантных расчетов значения температур перед газовой турбиной и перед КУ в зависимости от $\alpha''_{ГТУ}$ рассчитываются по формулам:

$$\vartheta'_{ГТ} = 1106 + 365 \cdot (3,07 - \alpha''_{ГТУ})^{1,08},$$

$$\vartheta'_{КУ} = 521 + 199,3 \cdot (3,07 - \alpha''_{ГТУ})^{1,45},$$

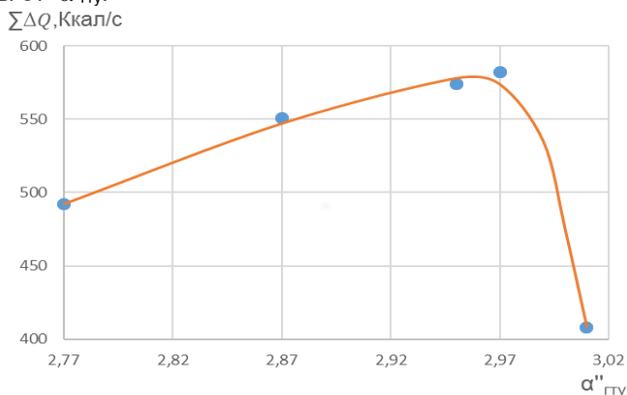
Расчетное исследование по определению оптимального значения $\alpha''_{ГТУ}$ проводилась с использованием данных табл. 1. В качестве базового варианта принят режим с максимальными значениями $\alpha''_{ГТУ} = 3,07$ и $Q_{ген} = 26785 \text{ ккал/с}$.

С использованием исходных данных были получены расчетные характеристики при проектных условиях: $N_э = 110 \text{ МВт}$ и $t_{нар} = 15^\circ\text{C}$.

Таблица 1. Результаты вариантных расчетов

Наименование характеристик	Значение коэффициента избытка воздуха $\alpha''_{гту}$					
	2,77	2,87	2,95	2,97	3,01	3,07
Изменение энергозатрат ВД ΔQ_1 , ккал/с	129	123	116	111,7	21,6	-
Изменение энергозатрат НД ΔQ_2 , ккал/с	-362	-272	-199	-143	-109	-
Расход теплоты на выработку эл-й мощности $Q_{ген}$, ккал/с	27510	27485	27440	27400	27270	26785
Изменение расхода теплоты на выработку эл-й мощности $\Delta Q_{ген}$, ккал/с	725	700	655	615	495	-
Суммарное изменение расхода в проточной части ПТ $\Sigma Q_{ген}$, ккал/с	492	551	572	584	408	-

На основании анализа получили зависимость суммарного расхода теплоты от $\alpha''_{гту}$.

Рис. 1. Зависимость изменения суммарного расхода теплоты от $\alpha''_{гту}$

По результатам выполненного исследования оптимальное значение коэффициента избытка воздуха за ГТУ $\alpha''_{гту}$ следует признать равным 2,97.

Литература

1. Мошкарин, А.В. Режимные характеристики ГТЭ-110 для энергоблока ПГУ-325 / А.В. Мошкарин, Б.Л. Шельгин, Т.А. Жамлиханов // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 2. – С. 7.

2. Мошкарин, А.В. Влияние определяющих факторов на изменение мощности ПГУ-325 / А.В. Мошкарин, Б.Л. Шельгин, Т.А. Жамлиханов // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 4. – С. 13.

3. Шельгин Б.Л. Режимы работы котлов-утилизаторов в составе ПГУ электростанций: Учебное пособие, издание 2-е, переработанное и дополненное / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2015. 128 с.

УДК 621.928

С.И. ШУВАЛОВ¹, д.т.н., профессор,
С.Д. ГОРШЕНИН, к.т.н., ст. преподаватель,
Г.Г. МИХЕЕВ, к.т.н., доцент, О.А. ВОРОШИЛОВ, инженер

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
Email: ShuvalovS@rambler.ru¹

Повышение эффективности улавливания пыли в циклонах ЦН-15 НИИОГАЗ

Аннотация: рассмотрен режим работы центробежного циклона с выводом части воздуха через конус, приведены результаты математического моделирования движения воздуха и частиц в циклоне, показано, что для обеспечения максимальной эффективности улавливания доля отбора должна составлять 4...6 %.

Ключевые слова: центробежный циклон, отбор воздуха, эффективность пылеулавливания.

S.I. SHUVALOV, Doctor of Engineering, professor,
S.D. GORSHENIN, Ph.D., art. teacher,
G.G. MIKHEEV, Ph.D., Associate Professor, O.A. VOROSHILOV, engineer

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
Email: ShuvalovS@rambler.ru¹

Improving the efficiency of dust collection in cyclones CC-15 NIIOGAZ

Abstract. The operation of the centrifugal cyclone with the withdrawal of the air through the cone, the results of mathematical modeling of the air flow and the particles in the cyclone, it is shown that in order to maximize the efficiency of capturing the share of the selection should be 4...6 %.

Keywords: centrifugal cyclone, air bleed, dust collection efficiency.

Для очистки воздуха от содержащихся в нем твердых частиц на предприятиях России широко используются циклоны ЦН-15 НИИОГАЗ. Согласно нормативным материалам по расчету и проектированию пылеприготовительных установок котельных агрегатов эти циклоны в зависимости от диаметра аппарата улавливают около 87...93 % посту-

пающей пыли. Проведенные нами расчеты по методике НИИОГАЗ [1], а также результаты промышленных испытаний циклонов \varnothing 4250 мм пылесистем блока 300 МВт Черепетской ГРЭС показали, что степень улавливания пыли с $R_{90}=7...9$ % этих циклонов составляет 57,5...69 %. Повышенный в 4...5 раз по сравнению с планируемым проскок пыли через циклон обусловлен не нарушениями условий эксплуатации, а связан несовершенством методики расчета пылеприготовительных установок.

Известно, что повышению эффективности улавливания пыли в циклоне способствует отвод некоторого количества воздуха через нижнее отверстие конуса циклона за счет увеличения вероятности осаждения содержащихся в потоке твердых частиц на стенках циклона.

Из литературных данных [2,3] известно, что отбор воздуха из бункера пыли в количестве 5...10 % от общего расхода увеличивает степень улавливания прямоочных циклонов на 5...7 %, однако для противочных циклонов, где принципиально другие диаметры аппаратов, аэродинамика потоков и эффективность улавливания, такие данные отсутствуют.

Для количественной оценки влияния доли отвода воздуха через конус циклона на эффективность пылеулавливания и выработки практических рекомендаций была разработана в среде SolidWorks имитационная модель циклона ЦН-15, включающая геометрическую модель циклона, модель расчета полей скорости, давления, турбулентной вязкости во внутреннем объеме циклона от входного патрубка до нижнего сечения конуса и верхнего сечения выходного патрубка и модель движения одиночных частиц в циклоне. Применительно к конструкциям и режимам работы пылесистем блока №7 Черепетской ГРЭС были проведены варианты расчеты газовых полей и траекторий частиц в рабочем пространстве циклона.

На первом этапе моделирования рассчитывались поля скоростей газа без учета присутствия в нем твердых частиц. Затем предполагалось, что в начальном сечении входного патрубка циклона равномерно размещены 1008 частиц одинакового размера δ , двигающихся со скоростями, равными скоростям газа в этом сечении. Далее рассчитывались траектории каждой частицы. При этом принималось, что при проходе по подводящему прямоугольному патрубку попавшая на стенку частица рикошетом возвращается в поток, в цилиндрической и конической части циклона на стенке частица тормозится и считается осажденной.

В общем случае эффективность (степень или КПД) улавливания циклона оценивается как средневзвешенная характеристика, определяемая как произведение фракционных степеней улавливания на плотность распределения частиц по размерам. В свою очередь, фракционная степень улавливания является функцией медианного размера частиц $\delta_{50ц}$, вероятность осаждения которых равна 0,5 или 50%.

Расчетная модель движения газа и частиц в циклоне не учитывает влияния случайных факторов и не предназначена для восстановления кривой фракционного осаждения во всем диапазоне изменения размеров частиц, но она вполне пригодна для прогнозирования усредненных характеристик, в частности, размера частиц $\delta_{50ц}$. Размер подаваемых в циклон частиц последовательными приближениями подбирался таким образом, чтобы количество осажденных и вынесенных из циклона частиц было одинаковым, т.е. равным 504.

Проверка адекватности имитационных моделей проводилась сопоставлением результатов вычислительных экспериментов с методикой НИИОГАЗ, которая была принята в качестве эталона. Полная степень улавливания определялась по методике НИИОГАЗ [1] с расчетом пофракционных степеней улавливания и дисперсного состава подаваемой в циклон пыли.

Расчеты показали, что доля отвода части воздуха через конус циклона пропорционально снижает медианный размер осаждаемых на стенках циклона частиц $\delta_{50ц}$, но одновременно в квадратичной зависимости увеличивает количество частиц, выносимых с проходящим через нижний конус воздухом. На основании результатов расчета получена методом наименьших квадратов зависимость медианного размера частиц, осаждаемых на стенках циклона, от доли отвода воздуха через конус циклона

$$\delta_{50,отв} = \delta_{50,ц} \left(1 - 2,21 \alpha_{отв} + 22 \alpha_{отв}^2 \right),$$

где величина $\delta_{50ц}$ рассчитывается по методике НИИОГАЗ [1]. Количество вынесенных через нижнее отверстие циклона вместе с воздухом частиц подсчитывалось отдельно и суммировалось с вынесенными вместе с основным потоком частицами через верхний патрубок.

Если принять, что очистка отбираемого через конус воздуха отсутствует, и все частицы с этим воздухом попадают в основной поток воздуха после циклона, то оптимальная доля отбираемого через конус воздуха, при которой будет достигнута наибольшая степень очистки, составит 4...6 % от основного расхода воздуха через циклон. При этом можно ожидать, что массовая доля уносимых вместе с воздухом частиц сократится также на 5 %.

В том случае, если предусматривается осаждение частиц из отводимого через конус воздуха, доля отвода и, соответственно, эффективность улавливания пыли в основном циклоне могут быть увеличены. Вероятность осаждения этих частиц зависит от способа отвода.

Приведенные количественные соотношения получены применительно к циклонам ЦН-15 \varnothing 4250 мм для плановой скорости воздуха в циклоне 3,5 м/с и очистки пыли с кажущейся плотностью 1350 кг/м³, тонкость которой характеризуется остатком на сите с ячейками 90 мкм $R_{90}=7$ % с коэффициентом полидисперсности $n=1,05$. Для других типовых размеров циклонов и режимов работы требуется пересчет результатов.

Представленные результаты, а также методика оценки эффективности улавливания пыли при частичном отборе воздуха из конуса циклона могут быть использованы при проектировании новых или реконструкции существующих установок с циклонами НИИОГАЗ типа ЦН-15.

Литература

1. **Справочник** по пыле- и золоулавливанию / М.И. Биргер, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков и др.; Под общ. ред. А.А. Русанова. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 312 с.
2. **Рекунов В.С.** Исследование эффективности пылеулавливания и гидравлического сопротивления прямоточных циклонов в единичном и каскадном исполнении. Дис. канд. техн. наук. Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2007. – 142 с.
3. **Асламова В.С.** Прямоточные циклоны. Теория, расчет, практика/ Ангарск: Ангарская государственная техническая академия, 2008. – 233 с.

УДК 620.9.004.896

В.А. ГОРБУНОВ, д.т.н., доцент, Н.А. ЛОНШАКОВ¹, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: nik-lon@mail.ru

Решение задач эффективности эксплуатации турбоустановок с применением нейросетевого инструментария на примере турбопитательных насосов АЭС

Аннотация: рассматривается целесообразность применения нейросетевых технологий для решения задач моделирования и повышения эффективности эксплуатации турбоустановок на примере турбопитательных насосов второго контура АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000.

Ключевые слова: искусственные нейронные сети, турбопитательный насос, эффективность, атомная электрическая станция.

V.A. GORBYNOV, Doctor of Engineering, docent,
N.A. LONSHAKOV, postgraduate student
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: nik-lon@mail.ru

The challenges of efficiency of the turbine plants with the help of neural network toolbox for turbine drive feed water pumps of NPPs

Abstract: the expediency of using neural network technologies for solving modeling problems and increasing the efficiency of operation of turbines is considered using the example of turbo drive feed water pumps of the second circuit of NPPs with VVER-1000 type reactors.

Key words: artificial neural networks, turbine drive feed water pump, efficiency, nuclear power plant.

Одним из основных показателей эффективности работы атомных электрических станций является коэффициент использования установленной мощности (КИУМ), подразумевающий под собой отношение фактической выработки мощности АЭС к установленному номиналу. В период с января по декабрь 2016 года КИУМ российских АЭС составил 81,95% [1].

Факторы, влияющие на рост коэффициента использования установленной мощности можно разделить на два типа: внутренние (станционные) и внешние (со стороны энергосистемы). Учитывая специфику эксплуатации отечественных АЭС, а именно работу преимущественно в базовом режиме, с минимальным вовлечением в процесс регулирования нагрузки энергосистемы, влияние на КИУМ внешних факторов минимизируется. Таким образом, коэффициент использования установленной мощности можно считать непосредственным показателем эффективности эксплуатации энергоблока АЭС. Также к внутренним факторам, оказывающим влияние на КИУМ, относятся длительность топливных компаний, продолжительность ремонтных работ и другие. Повышение эффективности перевода энергии, высвобождающейся при делении атомов урана, в электрическую энергию, вырабатываемую электрогенератором энергоблока, окажет прямое влияние на КИУМ в сторону его увеличения. Потери на каждом этапе перевода энергии отображаются в ряде КПД: реакторный, транспортный, парогенератора, турбоустановки. Все вышеуказанные коэффициенты полезного действия образуют КПД брутто энергоблока, однако этот показатель не в полной мере показывает эффективность преобразования энергии топлива, поскольку не учитывает затраты энергии, отпускаемой на собственные нужды станции. Таким образом, действительная эффективность работы энергоблока оказывается несколько меньше ввиду отвода части получаемой энергии на работу потребителей собственных нужд энергоблока и в наиболее полной мере отображается в КПД нетто.

Основными потребителями энергии, отпускаемой на собственные нужды атомной станции с ректорами типа ВВЭР, являются главные циркуляционные насосы первого контура, турбопитательные насосы второго контура, насосы системы циркуляционного водоснабжения и другие. Влияние потребителей собственных нужд станции на выработку электроэнергии, отпускаемой в энергосистему, ориентировочно оценивается в 3% КПД блока [2], что в свою очередь, составляет недовыработку до 90 МВт электрической энергии. Повышение эффективности эксплуатации турбопитательных насосов позволит повысить КПД нетто энергоблока, что приведет к увеличению выработки электричества и повышению КИУМ атомной станции.

В последнее время появилось множество инструментов для моделирования работы турбоустановок:

1. Поверочный расчёт турбины, разработанный на основе инженерных методик. К достоинствам данного метода можно отнести быстроту и достаточную наглядность, однако данный способ не отличается высокой точностью и не позволяет учитывать индивидуальные особенности режимов эксплуатации оборудования.

2. Моделирование оборудования на основе CAE и CFD пакетов. Трудоемкие задачи, требующие мощные вычислительные машины и большие временные затраты. Результаты вычислений, получаемые при использовании данного подхода, отличаются достаточно высокой точностью. Основными недостатками этого инструмента является относительно длительное время реализации и сложности в конструировании моделей.

3. Моделирование работы турбин на основе статистического анализа. К преимуществам данного вида моделирования можно отнести достаточно высокую точность описания явлений, происходящих в конкретной установке, но при моделировании происходит абстрагирование непосредственного от физической сущности объекта. Моделирование турбины может осуществляться с помощью пассивного промышленного эксперимента на основе линейного и множественного регрессионного анализа. В качестве недостатка можно отметить невозможность аппроксимации по экспериментальным данным любых сколь угодно сложных нелинейных зависимостей произвольного и заранее неизвестного вида. Результаты моделирования могут быть достоверны в таких моделях только в диапазоне изменения экспериментальных данных. Эти модели в отличие от других не требуют верификации, так как они получены в результате экспериментальных данных. В последнее время появился новый инструмент создания статистических моделей на основе экспериментальных данных - нейросетевое моделирование. В отличие от методов регрессионного анализа, для моделирования, основанного на нейросетевой технологии, не требуется первоначальное определение искомой функции зависимости.

Предварительные результаты применения нейронных сетей в процессе моделирования и оптимизации режимов эксплуатации турбопитательного насоса действующей АЭС (рис.) показали возможность снижения расхода тепловой энергии, отпускаемой для работы турбонасосного агрегата, на 5% от общих затрат энергии на исследуемый турбопитательный насос существующих в настоящее время. Это, в свою очередь, приведет к повышению мощности энергоблока на 0,5 МВт электрической энергии, не прибегая к конструкционным и другим материальным изменениям в действующем оборудовании [3].

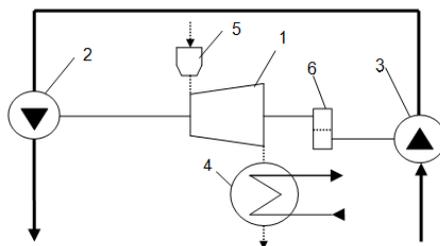


Рисунок. Принципиальная схема питательного турбонасосного агрегата:
1 - паровая турбина ОК-12А; 2 - главный питательный насос ПТ-3750-75;
3 - бустерный насос 400-QHD-спрес; 4 - конденсатор турбины;
5 - стопорно-регулирующий клапан; 6 - редуктор P2

Литература

1. Департамент информации и общественных связей АО «Концерн Росэнергоатом». URL: <http://www.rosenergoatom.ru/journalist/news/f632a1804f2b971e9ba1bfc779be2d77> (Дата обращения: 7.03.2017).
2. Современные проекты АЭС российского дизайна. Безопасность. Экономичность. / С.В. Онуфриенко // Международный Форум поставщиков атомной отрасли «АТОМЕКС Северо-Запад», URL: http://www.atomeks.ru/mediafiles/ufiles/MaterialsS_Z_2012/OnufrienkoSV.pdf (Дата обращения: 9.03.2017).
3. Дунаев В.А., Лоншаков Н.А., Горбунов В.А. К вопросу о повышении эффективности и безопасности эксплуатации тепломеханического оборудования АЭС // Глобальная ядерная безопасность. 2015. № 2 (15).

УДК 621.181

М.Н. МЕЧТАЕВА¹, инженер каф. АЭС,
В.А. ГОРБУНОВ², д.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: maria.mechtaeva@mail.ru, gorbynov.w@mail.ru

К вопросу о моделировании работы парогенератора

Аннотация: проводится моделирование работы парогенератора с целью исследования колебаний поверхности зеркала испарения, которые в значительной степени влияют на качество пара.

Ключевые слова: парогенератор, зеркало испарения, моделирование работы, качество пара.

M.N.MECHTAEVA, engineer of the NPP department,
V.A.GORBUNOV, Doctor of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: maria.mechtaeva@mail.ru, gorbynov.w@mail.ru

To the question of modeling the operation of the steam generator

Abstract. Simulation of the operation of the steam generator is carried out for the purpose of investigating the oscillations of the surface of the evaporation mirror, which greatly affect the steam quality.

Key words: steam generator, evaporation mirror, work simulation, steam quality.

Важнейшим элементом АЭС с реакторами с водой под давлением (ВВЭР и PWR) являются парогенераторы (ПГ), выдающие пар на турбогенератор для выработки электроэнергии.

Анализ существующей конструкции ПГ показал, что большая неравномерность нагрузки зеркала испарения (рис. 1) представляет определенные технические трудности в получении пара заданной влажности. Для решения вопроса о выравнивании нагрузки был проведен большой комплекс опытно-конструкторских работ [4].

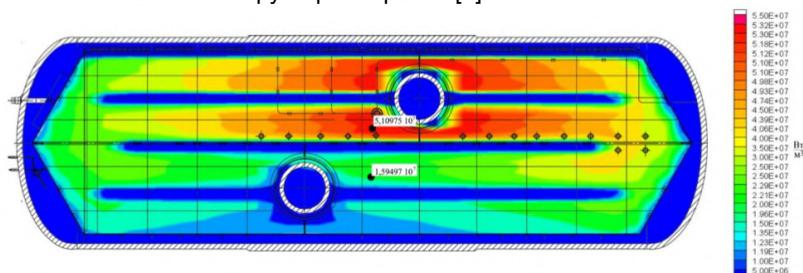


Рис. 1. Расчетная тепловая нагрузка ПГВ-1000М

Большинство исследований носят опытно-экспериментальный характер, что сопряжено со значительными финансовыми и временными затратами. Понятно, что такой метод неприменим для исследований и обоснования работоспособности парогенераторов и барабан-сепараторов современных АЭС, находящихся в стадии проектирования. Исходя из всего вышеперечисленного, целесообразным является проведение математического моделирования работы парогенератора и его основных узлов.

Ранее была проведена работа по моделированию работы сепарационного устройства ПГВ-1000М в пакетах SolidWorks и Ansys [3], где были приняты следующие допущения: зеркало испарения рассматри-

валось как гладкая поверхность, давление вдоль парогенератора не изменялось. Для того чтобы модель была наиболее близкой к действительности, необходимо эти допущения убрать, т.к. из-за разницы в тепловых нагрузках с «горячей» и «холодной» стороны в ПГ возникают перекосы уровня, паросодержания и скорости движения пара [5], что отражено на рис. 2 на примере паросодержания.

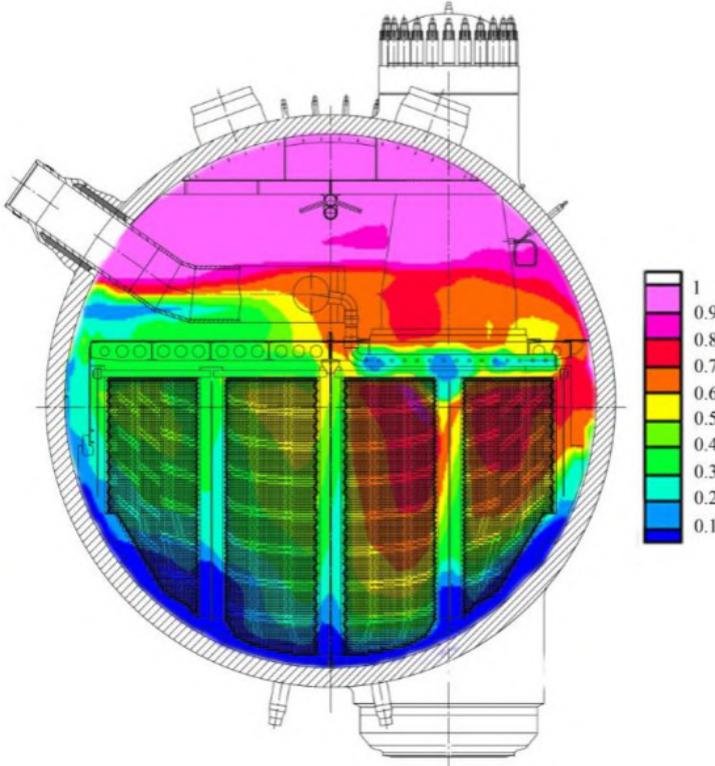


Рис. 2. Паросодержание в сечении ПГ

Цель данной работы – построение в математическом программном пакете модели, позволяющей исследовать колебания поверхности зеркала испарения парогенератора и влияние этих колебаний на качество пара.

Данная модель будет учитывать влияние расхода теплоносителя, глубины погружения погруженного дырчатого листа, типа перфорации ПДЛ и т.д. на величину площади зеркала испарения и, соответственно, на влажность пара, обусловленную капельным уносом. Задачи такого

типа ранее не решались, несмотря на то, что они очень важны для моделирования работы парогенератора.

Постановка задачи следующая: в работе моделируется колебание зеркала испарения парогенератора при помощи произвольного Лагранжево-Эйлера (ALE) метода (метод подвижных сеток) [1, 2]. Модель проектируется так, чтобы было возможным определить площадь поверхности зеркала испарения и влияние её на качество пара в разных условиях эксплуатации (изменение расхода теплоносителя, давления в ПГ, степень перфорации ПДЛ и т.д.).

В основе моделирования лежат дифференциальные уравнения движения, энергии, неразрывности, состояния, которые полностью определяют поведение динамической системы в любой момент времени.

Разрабатывается методика, позволяющая определить площадь поверхности зеркала испарения, как путем моделирования, так и экспериментальным путем.

Для повышения качества пара парогенератора предлагаются следующие способы выравнивания нагрузки зеркала испарения: переменная перфорация ПДЛ, соответствующая изменению нагрузки зеркала испарения по сечению ПГ; вариация уровня ПДЛ; переменная по длине ПГ перфорация пароприемного дырчатого листа.

Результаты данной работы могут быть использованы для моделирования парогенераторов и барабан-сепараторов АЭС, котлов парогенераторов ТЭС.

Литература

1. **Горбунов В.А.** Моделирование теплообмена в конечно-элементном пакете FEMLAB: Учеб. пособие / ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2008.–216 с.
2. **Красников Г.Е., Нагорнов О.В., Старостин Н.В.** Моделирование физических процессов с использованием пакета Comsol Multiphysics: Учебное пособие. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 184 с.
3. **Михеичев А.С.** Дипломная работа: Модернизация парогенератора ПГВ-1000М блоков ВВЭР-1000 АЭС, ИГЭУ, 2016
4. **Трунов Н.Б., Логвинов С.А., Драгунов Ю.Г.** Гидродинамические и технологические процессы в парогенераторах АЭС с ВВЭР. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 316 с.
5. **Трунов Н.Б., Лукасевич Б.И., Харченко С.А., Сотсков В.В.** Парогенератор ПГВ–1500, этапы разработки и развития. Четвертая международная научно–техническая конференция. Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики, РЭА, Москва, 19–21 апреля 2006.

УДК 620.9.004.896

В.А. ГОРБУНОВ, д.т.н., доцент,
Д.А. ГАЛАТА¹, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: orion.org@mail.ru¹

Повышение безопасности работы ТВЭЛа за счёт изменения его конструкции

Аннотация: рассматривается целесообразность изменения конструкции ТВЭЛ с целью снижения температуры внутри сердечника ТВЭЛа на основе частичной замены механизма передачи внутренней энергии с помощью теплопроводности на радиационный теплообмен за счёт изменения расположения топливных таблеток внутри ТВЭЛа.

Ключевые слова: ТВЭЛ, топливная таблетка, конструкция ТВЭЛа, снижение температуры.

V.A. GORBYNOV Doctor of Engineering, docent,
D.A. GALATA student

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: orion.org@mail.ru¹

Increasing of work safety fuel element through the change its construction

Abstract: the practicability of structure change fuel elements with the objective of lowering of temperature inside of core fuel elements on the basis of partial replacement of transmission mechanism of internal energy by means of heat conduction on radiation heat transfer at expense of rearrangement of fuel pellets inside fuel elements is being considered.

Key words: fuel element, fuel pellet, construction fuel elements, lowering of temperature.

Самым распространенным химическим соединением, которое используется в энергетических ядерных реакторах, является диоксид урана UO_2 . Данный материал обладает высокой температурой плавления порядка $2800^{\circ}C$, и не так подвержен распуханию, как сплавы урана. Его плотность – $10,2 \text{ г/см}^3$. При этом диоксид урана обладает низкой теплопроводностью, ограничивающей удельную мощность реактора. Плотность теплового потока в реакторах, использующих диоксид урана в качестве ядерного топлива мала, ограничена температурой в центре ТВЭЛа. Температура в центре не должна быть больше температуры плавления UO_2 , что опасно и недопустимо. Исследуемый ТВЭЛ (рис. 1) имеет внешний диаметр оболочки из сплава циркония

9,1 мм – 2, диаметр сердечника, состоящего из таблеток уранового топлива 7,53 мм - 1.

Одним из эффективных методов снижения температуры ТВЭЛа является частичная замена механизма передачи внутренней энергии внутри ТВЭЛа с помощью теплопроводности на радиационный теплообмен между торцевой поверхностью топливной таблетки и поверхностями, включающими внутренние поверхности торца соседней таблетки и кольцевой поверхности зазора оболочки ТВЭЛа. Для этой цели предполагается между топливными таблетками делать зазор. В

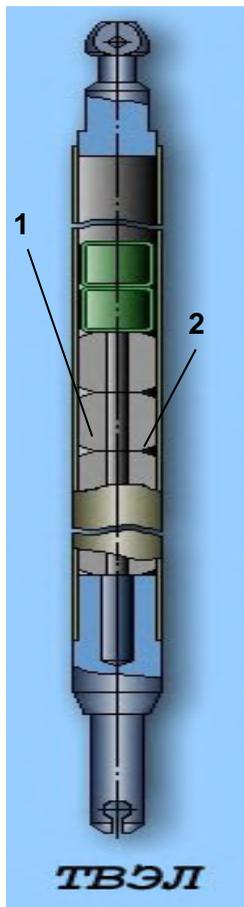


Рис. 1. Конструкция ТВЭЛа

данном случае фиксация зазора между таблетками осуществляется при помощи шайб из того же материала из которого изготовлена оболочка ТВЭЛа. Задачей исследования являлось уменьшение температуры в центре топливного сердечника в зависимости от величины зазора.

Моделирование работы ТВЭЛа и расчетные исследования были выполнены при помощи программного комплекса ANSYS FLUENT [1], результаты приведены на рис. 2.

В данной работе приведено сравнение тепловыделяющего элемента традиционной конструкции и ТВЭЛа, в конструкции которого топливные таблетки разнесены между собой за счёт использования между тепловыделяющими таблетками специальных шайб. На рисунке представлено температурное поле ТВЭЛа с зазором между топливными таблетками равным 8 мм. Создание зазора между топливными таблетками 8 мм позволяет снизить температуры температуры теплового центра в тепловыделяющем элементе с 1331 до 1090 К, что повышает безопасность работы ТВЭЛа.

В работе проведено расчётное исследование влияния зазора между таблетками на температуру центра топливного элемента.

По результатам расчётного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Применение зазора между тепловыделяющими таблетками позволяет повысить безопасность эксплуатации ТВЭЛов за счёт снижения температуры в тепловом центре тепловыделяющего элемента. Но требуются дополнительные исследования с точки зрения

Но требуются дополнительные исследования с точки зрения

тенденции, складывающейся в последнее время в атомной энергетике к переходу на 18-месячный топливный цикл и повышению мощности блока до 104 % [2], которые повышение энергопотенциала ТВС предполагают обеспечивать за счёт увеличения массы урана-235 в ТВС.

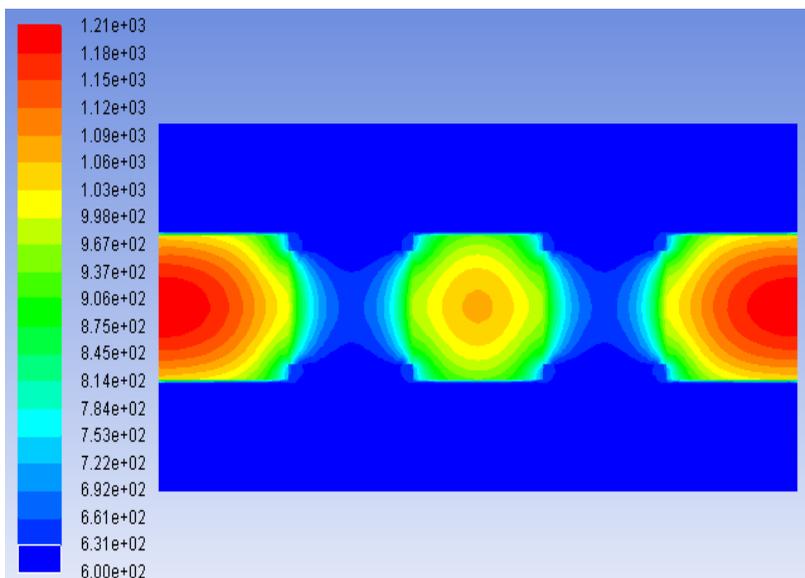


Рис. 2. Температурное поле ТВЭЛа с использованием зазора между таблетками

2. Использование зазора между топливными таблетками позволяет также уменьшить температурные напряжения в топливном сердечнике.

Литература

1. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособ. / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Е.А. Солдусова, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов. – Самара: Сам- ГТУ, 2010. – 271 с.
2. Атомная энергетика в вопросах и ответах http://www.tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite/about_atomic/faq/ (Дата обращения: 14.03.2017). АЭС // Глобальная ядерная безопасность. 2015. №2 (15).

УДК 621.039

А.Г. ИЛЬЧЕНКО¹, к.т.н., доцент,
И.М. СОЛОВЬЕВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: ilchenko_47@mail.ru

Анализ эффективности водородно-энергетического комплекса на основе энергоблока с ВВЭР-1200

Аннотация: рассмотрено применение водородно-энергетического комплекса для получения дополнительной электроэнергии при получении водорода и кислорода за счет ночной электроэнергии АЭС. Определены показатели экономической эффективности с учетом системных эффектов.

Ключевые слова: атомная электростанция, водородно-энергетический комплекс, режимы работы, экономическая эффективность.

A.G. ILCHENKO, candidate of Technical Sciences, assistant professor,
S.M. SOLOVYOV, student,

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskay St., 34
E-mail: ilchenko_47@mail.ru

Analysis of the efficiency of the hydrogen-energy complex based on the VVER-1200 power unit

Abstract. The application of the hydrogen-energy complex for obtaining additional electric power for the production of hydrogen and oxygen due to the night power of the nuclear power plant is considered. Indicators of economic efficiency are determined taking into account systemic effects.

Key words: nuclear power plant, hydrogen-energy complex, operating modes, economic efficiency

Одним из приоритетных направлений обеспечения безопасной и эффективной работы АЭС является обеспечение их базисной электрической нагрузкой. Это позволит повысить коэффициент использования установленной мощности АЭС.

Эффективное расхождение ночных минимумов в графиках электрических нагрузок возможно за счет:

1. разгрузки или останова энергоблоков ТЭС и АЭС в часы провала нагрузки;

2. выравнивания графиков потребления электроэнергии за счет дифференцированных тарифов;

3. использование внепиковой электроэнергии для энергоемких потребителей:

- электрохимическое аккумулирование;
- электротеплоснабжение;

- электролиз воды с целью производства водорода и кислорода.

Перспективным решением эффективного прохождения ночных минимумов электрической нагрузки для АЭС является использование внепиковой электрической мощности энергоемкими потребителями.

Одними из таких потребителей являются установки электролиза воды. Производимые надстройками ВЭК водород и кислород могут использоваться в целях:

1. производства пиковой электроэнергии в часы пикового энергопотребления за счет пароводяного перегрева пара от ППУ без изменения режимов работы реакторной установки;
2. резервирования собственных нужд АЭС в условиях полного обесточивания, приводящего к повышению безопасности;
3. коммерческой товарной реализации генерируемых газов.

Хранение водорода и кислорода в подземных резервуарах является предпочтительным. Но в условиях суточных циклов, когда время хранения газов может составлять от нескольких часов до нескольких суток, наиболее целесообразно хранение водорода и кислорода в сжатом виде в наземных газгольдерах.

На рис. 1 показана принципиальная схема водородного энергетического комплекса.

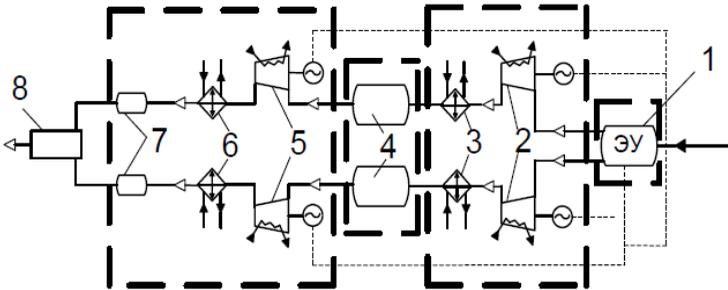


Рис. 1. Принципиальная схема водородного энергетического комплекса
 1 – электролизный цех с электролизными установками; 2 – внепиковые компрессорные агрегаты; 3, 6 – теплообменники; 4 – емкости хранения водорода и кислорода; 5 – пиковые компрессорные агрегаты; 7 – буферная емкость; 8 – узел водородного перегрева рабочего тела паросилового цикла АЭС

В ночные внепиковые часы электрической нагрузки за счет электролиза воды происходит аккумулярование водорода и кислорода, которые при помощи дожимных компрессорных агрегатов поступают в емкости хранения. Затем водород и кислород отбирается из емкостей хранения и при помощи дожимных компрессорных агрегатов подаются в пароводородный перегреватель. В пароводородном перегревателе за счет высокотемпературного пара, полученного в результате ступенчатого окисления водорода кислородом и его смешения с основным па-

ром, происходит перегрев до заданной температуры. Температура как свежего пара, так и пара перед ЦНД может быть повышена до более высоких, чем номинальные, значений (в пределах, допускаемых заводом-изготовителем паровой турбины).

Предлагаемая схема позволяет обеспечить надежный и эффективный режим работы ГТУ энергоблока при повышении её пиковой мощности за счет водородного перегрева.

Повышение мощности энергоблока АЭС достигается за счет того, что высокотемпературный пар, получаемый в процессе сжигания водорода в кислороде, смешиваясь с основным паром в пароводородном перегревателе и перегревая его до заданной температуры, вытесняет свежий и отборный пар, предназначенный для осуществления перегрева основного пара. При этом вытесненный пар также может быть перегрет в пароводородном перегревателе до необходимой температуры, что повысит общую эффективность комбинированной установки.

Проведенные расчеты выявили заметную эффективность предлагаемых решений в широком диапазоне стоимостей органического топлива и капитальных затрат в электролизные установки. Стоимость пиковой электроэнергии, вырабатываемой при использовании ВЭК, также оказывается меньшей, чем вырабатываемой на специализированных пиковых ГТУ при числе часов использования максимума электрической нагрузки 1000-1500 часов в год.

Расчеты показали также, что использование ВЭК в режиме недельного регулирования оказывается экономически не эффективным.

В случае необходимости прекращения подачи кислорода и водорода по каким-либо причинам, энергоблок переходит в обычный режим работы.

Использование ВЭК в качестве аккумулирующей системы позволяет преодолеть трудности, связанные с диверсификации источников электроэнергии и усложнением систем регулирования, обеспечить высокое качество и надежность электроснабжения.

Литература

1. **Байрамов А.Н.** Эффективность интеграции АЭС с водородным энергетическим комплексом. Автореферат. Саратов 2010.
2. **Егоров А.Н.** Разработка и обоснование водородного энергетического комплекса влажнопаровых турбин АЭС с установкой дополнительной турбины. Автореферат. Саратов 2013.
3. **Аминов Р.З.,** Егоров А.Н., Юрин В.Е. Резервирование собственных нужд АЭС в условиях полного обесточивания на основе водородного цикла // Атомная энергия. 2013. №4 (114). С.234–236.
4. **Аминов Р.З.,** Шкрет А.Ф., Гариевский М.В. К вопросу обеспечения режимных требований в условиях развивающейся атомной энергетики // Труды Академэнерго. 2013. №4. С.61–69.

УДК 621.039

С.В. ГРУЗДЕВ, студент, А.Г. ИЛЬЧЕНКО¹, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: ilchenko_47@mail.ru

Эффективность применения ГТУ с котлом-утилизатором на АЭС с ВВЭР-1200

Аннотация: рассмотрено применение газотурбинных установок (ГТУ) с котлами-утилизаторами (КУ) в составе АЭС с энергоблоками с ВВЭР-1200. Приведены варианты интеграции ГТУ с КУ одного и двух давлений в тепловую схему турбоустановки К-1200-6,8/50 и определены показатели тепловой экономичности.

Ключевые слова: атомная электростанция, газотурбинная установка, котел-утилизатор, экономичность.

S.V. GRUZDEV, student,
A.G. ILCHENKO, candidate of Technical Sciences, assistant professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskay St., 34
E-mail: ilchenko_47@mail.ru

Efficiency of GTU application with boiler-utilizer for NPP with WWER-1200

Abstract. The application of gas turbine units (GTU) with waste heat recovery boilers (CG) in the structure of NPPs with VVER-1200 power units is considered. The variants of integration of gas turbine units with CU of one and two pressures into the thermal scheme of the turbine unit K-1200-6,8/50 are given and the indicators of thermal efficiency are determined.

Key words: nuclear power plant, gas turbine unit, waste heat boiler, efficiency.

Одним из направлений по повышению маневренности и эффективности энергоблоков АЭС является комбинирование энергоблоков АЭС и ГТУ. Варианты интеграции ГТУ в тепловую схему энергоблоков АЭС с ВВЭР отличаются достаточным разнообразием. В ряде работ были рассмотрены схемы с газо-водяными подогревателями и газопаровыми перегревателями [1, 2], включенными, соответственно, в схемы регенерации и паропарового перегрева паровых турбин АЭС. Применение этих схем заметно повышает эффективность АЭС. Однако, в случае реконструкции действующих блоков АЭС, их применение сопряжено со значительными трудностями, связанными с необходимостью компоновки газотурбинного оборудования, газопаровых (газо-водяных) теплообменников и газоходов в машинном зале станции. В этом случае более рациональным представляется применение схем с котлами-утилизаторами (КУ). Следует отметить, что

варианты с котлами-утилизаторами имеют, в целом, более низкую термодинамическую эффективность, однако они проще с точки зрения компоновки оборудования и требуют минимального объема работ по реконструкции. Ниже приведены результаты анализа тепловой экономичности несколько схем комбинирования блока АЭС с ВВЭР-1200 по проекту АЭС-2006 и ГТУ:

- схема с КУ двух давлений и переключением питания сепаратора пароперегревателя (СПП);
- схема с КУ одного давления и переключением СПП;
- схема с КУ и подогревателем высокого давления (ПВД);
- схема с КУ и вводом пара перед ЦВД;
- схема с КУ и подводом пара перед ЦНД.

Схема с КУ двух давлений предполагает отключение отборов на СПП I и II ступени, греющий пар подается из контуров высокого и низкого давления КУ. Пар вытесненных отборов идет на выработку дополнительной мощности в турбине. Отбор конденсата для питания КУ выполнено из тракта после ПНД-1 по ходу движения основного конденсата. Аналогично работает и схема с КУ одного давления, но в данной схеме отключается I ступень СПП, перегрев пара осуществляется только во II ступени. Мощность ЯППУ остается постоянной и параметры пара в парогенераторе (ПГ) поддерживаются номинальными.

Схема с КУ и подогревателем высокого давления предполагает отключение ПВД-6 и ПВД-7 по греющему пару. Подогрев питательной воды осуществляется только в ПВД-7 за счет теплоты от греющего пара КУ. Слив конденсата осуществляется в тракт за ПЭН.

Схемы с дополнительным подводом пара из КУ перед ЦНД и ЦВД предполагают повышение параметров перед цилиндрами, а также увеличивается общий расход через турбину.

Из таблицы видно, что наибольшее приращение экономичности $\Delta\eta=9,375\%$ по сравнению с номинальным режимом работы энергоблока можно достигается для схемы с КУ двух давлений и использованием генерируемого в нем пара для питания СПП. При этом параметры пара перед ЦНД соответствуют номинальным.

Исполнение котла-утилизатора в двухконтурном варианте позволяет добиться максимальной глубины охлаждения газов. При использовании двух ГТУ фирмы Siemens (GasTurbineSGT5-8000H) электрическая мощность ГТУ составляет 800 МВт, а турбина К-1200-6,8/50 за счет отключения отборов на СПП увеличивает свою мощность на 139 МВт. При сопоставлении с замещаемыми пиковыми ГТУ данная схема имеет значительную экономическую выгоду по производству пиковой электроэнергии и соответственно, стоимость пиковой электроэнергии существенно ниже, чем у специализированных пиковых ГТУ.

Тепловые и атомные электрические станции

Таблица. Результаты теплового расчета комбинированных схем

Величина	Базовая схема (ном. режим)	Схема с КУ двух давлений	Схема с КУ одного давления	Схема с КУ и ПВД	Схема с подводом пара перед ЦВД	Схема с подводом пара перед ЦНД	
Давление на входе в турбину, МПа	6,428	6,799	6,796	6,428	6,363	6,428	
Энтальпия свежего пара, кДж/кг	2767,5	2767,5	2767,5	2767,5	2776,8	2767,5	
Расход пара на турбину, кг/с	1709,2	1823,3	1823,4	1681,7	1853,7	1710,5	
Мощность КУ, МВт	—	393,35					
Параметры КУ	Расход пара, кг/с	—	96,6/77	155,6	155,6	150,1	139,6
	Давление пара, МПа	—	6,58/2,68	5,08	2,40	6,86	0,98
	Температура пара, °С	—	283/232	266,9	221,9	309,9	313,0
	Расход газа, кг/с	—	530,2 (ГТУ фирмы Siemens Gas Turbine SGT5-8000H)				
	Температура газов на входе, °С	—	627,4				
	Температура газ-ов на вы-ходе, °С	—	194,15	228,40	228,72	228,72	228,76
Электрическая мощность brutto, МВт	1193,48	1332,03	1317,08	1308,42	1327,06	1288,66	
Электрическая мощность ГТУ, МВт	—	400·2=800					
Тепловая мощность ЯПГУ, МВт	3211,48						
Тепловая мощность КС ГТУ, МВт	—	684,91·2=1369,82					
Увеличение эл. мощности ПТУ, МВт	—	138,553	123,60	114,94	133,58	95,183	
Электрическая мощность ПГУ, МВт	—	2132,03	2117,08	2108,42	2127,06	2088,66	
Электрический КПД ПГУ, %	—	46,538	46,211	46,022	46,429	45,591	
Увеличение КПД, %	—	9,375	9,048	8,859	9,266	8,428	

Литература

- Хрусталеv, В.А., Наумов А.С. Вопросы комбинирования схем ГТУ и АЭС и их эффективность. Вестник СГТУ. 2011. №1(54). Выпуск 3. С. 144.
- Ильченко А.Г. и др. Эффективность применения парогазовых технологий на АЭС с турбинами насыщенного пара. Вестник ИГЭУ. Вып.5, Иваново, 2015, с.2.

УДК 621.039

В.К. СЕМЕНОВ, д.т.н., профессор,
М.А. ВОЛЬМАН, старший преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: maria_volman@mail.ru

Методики моделирования на тренажере энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 пуска и останова блока

Аннотация. Разработаны методики моделирования на тренажере пуска и останова энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000. Их применение позволяет приобрести навыки управления технологическими процессами и систематизировать теоретические знания об оборудовании и системах энергоблоков.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР, подготовка персонала, тренажеры.

V.K. SEMENOV Doctor of Engineering, professor,
M.A. VOLMAN senior teacher

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: maria_volman@mail.ru

Procedural guidelines for simulation of generating unit startup and shutdown on simulator VVER-1000

Abstract. Procedural guidelines for simulation of generating unit startup and shutdown on simulator for nuclear power plants using water-cooled reactors VVER-1000 are designed. This enables personnel to practice their process control skills and systematize theoretical knowledge of generating unit components.

Key words: nuclear power plant, water-cooled power reactor, personnel training, simulators.

Характер эксплуатации современных атомных электростанций таков, что оператор может длительное время не участвовать в пуске и останове блока. Отработка действий оперативного персонала в этих режимах производится при помощи тренажеров и в программах подготовки занимает значительную долю практических занятий в части режимов нормальной эксплуатации. Процедуры пуска и останова наилучшим образом подходят для тренировки навыков по анализу ситуации и выработке управляющих решений в различных режимах работы не только реакторной установки, но и всех систем энергоблока и входящего в их состав оборудования.

Тренажеры могут эффективно применяться также и в вузовской и предварительной подготовке будущего оперативного персонала. Особенно актуальным является применение для этих целей аналитических тренажеров, реализованных на персональном компьютере, которые, в том числе, позволяют организовать самостоятельную работу обучаемых.

Однако это требует разработки соответствующего методического обеспечения, базой которого должны быть действующие руководящие документы и инструкции. Эти документы должны быть адаптированы и переработаны с учетом специфики решаемых учебных задач.

Разработанные методики моделирования пуска и останова энергоблока предназначены для аналитического и полномасштабного тренажеров энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000. В основе тренажерных комплексов лежит математическое моделирование нейтронно-физических, тепломеханических, теплофизических и других процессов и, как следствие, построение модели функционирования энергоблока в различных режимах в реальном времени. Аналитический тренажер реализован на персональном компьютере в программной среде ZKeyMaster™, (программный продукт ООО «Вестерн Сервисез» [1]). Его широкие возможности позволяют проводить эксперименты над активной зоной, моделировать различного рода штатные и аварийные ситуации, а мобильность и удобство при работе на персональном компьютере дают возможность эффективно использовать тренажер в учебном процессе. Полномасштабный тренажер имеет идентичное программное обеспечение в дополнении к полномасштабной модели реального блочного щита управления.

В качестве учебной задачи разработана методика моделирования нормального (не аварийного) останова энергоблока с переводом реакторной установки в «горячее» состояние и пуска из достигнутого состояния с выводом реакторной установки на энергетический уровень мощности. Эти режимы предполагают взаимодействие моделируемого оборудования энергоблока в широкой совокупности физических процессов, которые в нем протекают. Моделирование производится на основе адаптированной типовой пошаговой программы пуска-останова с учетом базового перечня операций по пуску-останову, порядка и последовательности их выполнения для энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 с учетом правил и основных приемов безопасной эксплуатации и общего порядка выполнения операций, связанных с безопасностью реакторной установки, установленных «Технологическим Регламентом эксплуатации реакторной установки В-320 энергоблока АЭС» [2].

Останов энергоблока – это перевод его из режима работы на мощности с выдачей электроэнергии в сеть в один из стояночных режимов. Нормальный останов производится для выполнения плановых предупредительных ремонтов, для замены ядерного топлива или в случае появления неполадок и неисправностей, при наличии которых работа реактора на мощности запрещается, но допускается нормальный останов. Реализация режима осуществляется оперативным персоналом по установленному алгоритму путем постепенного понижения мощности, а также снижения температур, давлений, уровней и/или других технологических параметров со скоростями изменения, не превышающих установленных величин (эксплуатационных пределов). Алгоритм останова, в том числе

скорости изменения мощности и параметров, очередность и порядок отключения оборудования, различного рода требования и ограничивающие условия, тщательно прорабатываются на стадии проектирования и регламентируются в эксплуатационной документации. Блок последовательно переводится персоналом из состояния «работа на мощности» в состояние «горячий останов», затем в «холодный останов» и, наконец, в конечное «перегрузочное (или ремонтное) состояние».

Разработанная учебная задача подразумевает моделирование перехода в состояние «горячий останов». Это же состояние используется для дальнейшего подъема мощности, имитирующего пуск после кратковременного останова, что предполагает ввод в работу отключенного оборудования и достижение номинальных параметров энергоблока. Методические рекомендации содержат описание действий, которые необходимо выполнить на тренажере, предполагающие как воздействие на имитируемые органы управления, так и взаимодействие с органами контроля с указанием наименований требуемых органов и номеров панелей и пультов, на которых они расположены. Симуляция предполагает также снятие и анализ зависимостей во времени основных параметров энергоблока.

Использование тренажеров в учебном процессе является очень мощным инструментом по формированию профессиональных компетенций будущего специалиста. Работа с тренажерными комплексами в вузе способствует формированию профессионального мышления, а также является эффективным средством личностного становления будущего оператора. Поэтому в ходе работ по моделированию пуска и останова энергоблока на полномасштабном тренажере ведутся исследования по выявлению индивидуально-личностных качеств, влияющих на успешность выполнения тренажерных заданий. Личностные особенности – один из компонентов компетенций, влияющий на скорость и эффективность их формирования. У студентов с разным уровнем успешности выполнения задач тренажерной подготовки выявляются значимые различия в показателях выраженности личностных качеств. Их анализ дает возможность развивать методический аспект обучения на основе как комплексных решений, так и индивидуальных рекомендаций обучаемым [3].

Разработанные методики моделирования на тренажере пуска и останова энергоблока АЭС являются частью единого обучающего комплекса, направленного на интенсификацию и повышение эффективности подготовки будущего оперативного персонала за счет использования средств компьютерного моделирования. В свою очередь уровень подготовки персонала является одним из важных факторов обеспечения эксплуатационной безопасности ядерноэнергетических объектов.

Литература

1. **Western Services Corporation** [официальный сайт]. URL: <http://www.ws-corp.com>
2. **Типовой** технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 (В-320): ТРВ-1000-4 / ВНИИАЭС. – М., 1998 – 328 с.

З. Крюкова Т.Б., Вольман М.А., Баранец В.Э. Психологическое обеспечение тренажерной подготовки студентов специальности 141403.65 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» // Внутривузовские инновационные образовательные проекты (работы) в 2014 г.: сб. отчетов / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2015. – С. 78–83.

УДК 377.169.3

В.Г. РАБОТАЕВ, к.т.н., доцент,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: npp@aes.ispu.ru

Применение компьютерных систем при изучении курса «Насосы АЭС»

Аннотация: представленная работа рассматривает вопросы применения компьютерных систем при изучении курса «Насосы АЭС», который реализуется в ИГЭУ им. В.И. Ленина и направлен на повышение активности студентов при изучении теоретической и практической составляющей данного курса.

Ключевые слова: компьютерная обучающая система, атомная электростанция, насосное оборудование, тестовые задания.

V.G. RABOTAEV, candidate of Technical Sciences, docent,
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: npp@aes.ispu.ru

Application of computer training systems of the course "Pumps of NPP"

Abstract. The presented work considers the application of computer systems in the course "Pumps of nuclear power plants", which is being implemented at the ISEU named after V.I. Lenin and is aimed at increasing the activity of students in studying the theoretical and practical component of this course.

Key words: Computer training system, nuclear power plant, pumping equipment, test tasks.

На атомных электростанциях (АЭС) насосное оборудование обеспечивает работу всех технологических и вспомогательных систем. Условно рассматривая все оборудование АЭС по технологическому признаку, можно выделить следующие укрупненные блоки (части) с точки зрения использования насосного оборудования:

- реакторную часть;
- паротурбинную часть;
- конденсационную часть.

В каждой из этих систем насосам отводится значительная роль. Так в реакторной части – это главный циркуляционный насос, который обеспечивает циркуляцию теплоносителя в первом (радиоактивном) контуре АЭС. В паротурбинной части – питательный насос, подающий конденсат отработавшего в турбине пара в парогенератор, и в конденсационной части – циркуляционный насос, подающий воду из внешнего водоема на охлаждение и конденсацию отработавшего в турбине пара.

Кроме перечисленных основных насосов на АЭС большое количество насосов работает в технологических системах второго контура и в системах, обеспечивающих безопасность эксплуатации станции (например, сливные, дренажные и т. д.).

Работа оперативного персонала (и в первую очередь, это относится к персоналу низшего звена) в большой мере связана с эксплуатацией насосных установок. Выпускник высшего учебного заведения, приступая к работе в должности оперативного работника, обязан пройти стажировку на всех рабочих местах, начиная с низшей ступени.

При исполнении любых должностных обязанностей оперативный работник постоянно сталкивается с необходимостью эксплуатировать, обслуживать насосное оборудование и его анализировать состояние. В связи с этим знание вопросов эксплуатации насосного оборудования имеет достаточно большое значение.

Подготовку специалистов для атомных станций выполняет кафедра АЭС ИГЭУ. Учебным планом предусмотрено изучение курса «Насосы АЭС». Знания о насосах (классификация, принцип действия, основы теории, характеристики, работа в сети, основы эксплуатации, конструкция) даются во время лекционных занятий. Умение эксплуатировать насосы в некоторой мере реализуется при выполнении лабораторных работ по этому курсу, но навыки эксплуатации насосного оборудования при обучении в высшем учебном заведении приобрести затруднительно.

Интенсификации процесса обучения помогают компьютерные средства.

При изучении курса «Насосы АЭС» используется интерактивная компьютерная программа, включающая в себя информационно-справочную систему (ИСС) и контролирующую часть.

В состав ИСС входят основные разделы курса «Насосы АЭС».

Информация предоставляется пользователю в традиционном виде:

- текст;
- рисунки;
- анимация;
- видеосюжеты.

Текстовая информация ИСС по объему значительно превышает читаемый на кафедре АЭС соответствующий курс лекций. Это позволяет использовать ее в качестве справочника.

Рисунки, особенно относящиеся к разделу «Конструкции насосов», затруднительно воспроизвести мелом на доске. Разработан компью-

терный альбом, в котором представлены конструкции основных насосов АЭС. Это позволяет показать студентам на интерактивной доске не только общую конструкцию насоса, но и его отдельные узлы.

Особый интерес у студентов вызывают демонстрируемые анимационные сюжеты, которые иллюстрируют наиболее трудно воспринимаемые вербально сведения.

Примером такого сюжета может быть явление, называемое при изучении курса «Насосы АЭС» углом отставания. Для демонстрации этого явления разработан анимационный файл, фрагмент которого приведен на рис. 1.

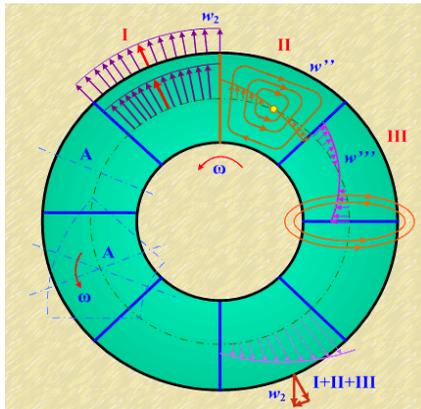


Рис. 1. Фрагмент анимационной программы, демонстрирующей возникновение угла отставания в ступени центробежного насоса

Не меньший интерес вызывают видеосюжеты.

Контролирующая часть является итоговой при изучении курса. В нее входят как тесты, так и творческие задания для студентов. При выполнении творческих заданий студенты используют литературу, доступную в учебном заведении, и источники информации, которые предоставляются в интернет-ресурсах.

Тестовые задачи, используемые при оценке освоения курса, группируются по нескольким критериям.

Используются как традиционные способы проверки знаний: выбор одного ответа из нескольких; выбор нескольких ответов из нескольких; выбор области на экранном рисунке; ввод числа, так и дополнительные методы контроля знаний: выполнение последовательности действий; минитренажерные задачи.

Под минитренажерными задачами понимается компьютерная программа, которая позволяет обработать на ПЭВМ локальную задачу, связанную с эксплуатацией насосов АЭС.

В перечень таких задач включены: вывод насоса из ремонта в резерв; ввод насоса из резерва в работу; постановка насоса в режим автоматического ввода резерва; вывод насоса из работы в резерв; вывод насоса из резерва в ремонт.

Результаты работы студентов в течение семестра регистрируются в электронном журнале учета успеваемости, адаптированном к принятой в ИГЭУ системе РИТМ.

Для осуществления обратной связи «студент – преподаватель» регулярно публикуются показатели успеваемости, по которым каждый студент может судить о своей текущей успеваемости по изучаемому курсу.

УДК 621.039.6

М.В. ДМИТРИЕВ, к.т.н., доцент,
А.М. ДМИТРИЕВ, гл. спец.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: sistema1@mail.ru

Возможности кинетического способа управляемого термоядерного синтеза

Аннотация. Кинетический способ управляемого термоядерного синтеза дает возможность получать плотную плазму с такими же параметрами, как при ядерном сжигании, и реализовывать термоядерные микровзрывы.

Ключевые слова: кинетический способ, термоядерное топливо, ускоритель.

M.V. DMITRIEV, PhD in Technical Sciences, Associate Professor,
A.M. DMITRIEV, Chief Specialist
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: sistema1@mail.ru

Potential of kinetic method of controlled thermonuclear fusion

Abstract. Kinetic method of controlled thermonuclear fusion makes it possible to get dense plasma with the same characteristics as in the process of nuclear ignition and carry out thermonuclear micro explosions.

Key words: kinetic method, thermonuclear fuel, accelerator.

Исследования по термоядерной проблеме более шестидесяти лет проводятся с равнокомпонентной смесью дейтерия и трития, реакцию слияния которых легче инициировать сравнительно с реакциями водорода с другими элементами. За этой смесью закрепилось название «термоядерное топливо». Из двух десятков реакций, приводимых в [1], половину можно применить для реализации управляемого термоядерного синтеза.

В пятидесятых годах прошлого века был разработан способ поджигания одной смеси с помощью ядерного заряда. Под воздействием взрыва килограммы топлива сжимались до давления порядка петापаскаля, нагревались примерно до ста миллионов градусов и сгорали во взрывном режиме. Теплота сгорания нового топлива оказалась на шесть-семь порядков по величине больше теплоты сгорания ископаемых углеводородов, и этот факт положил начало широкому фронту исследований в целях разработки способов неядерного поджигания малых порций топлива, чтобы выделяемую энергию можно было утилизировать в паровом котле электростанции.

Выделились два направления исследований: с плазмой низкой концентрации и с плотной плазмой. На первом направлении эксперименты проводились в разрядной камере с концентрацией смеси 10^{20} м^{-3} (при комнатной температуре давление менее одного паскаля), которая поджигалась мощным электрическим разрядом. Положительного результата на этом направлении получить не удалось. Следует заметить, что при таком низком давлении химическая реакция между водородом и кислородом не инициируется электрической искрой.

На втором направлении предполагалось плотность твердой смеси дейтерия и трития увеличить примерно в тысячу раз, обстреливая симметрично капсулу со смесью мощными импульсами лазерного излучения или даже пучками тяжелых ионов, и реализовать термоядерный микровзрыв. Но и на этом направлении не удалось получить плотную плазму с параметрами, близкими к тем, что реализуются при ядерном поджигании.

В кинетическом способе [2], который можно отнести ко второму направлению, малые порции твердого топлива разгоняются в ускорителях до скорости, близкой к тысяче километров в секунду, и при встречном столкновении образуют сгусток плазмы примерно с такими же параметрами, как и при ядерном поджигании. Предполагается, что в таком сгустке реагенты будут сгорать во взрывном режиме.

Одна из особенностей этого способа заключается в том, что порции топлива в процессе накопления кинетической энергии в ускорителе остаются при той же температуре, что и на старте, и немного нагреваются при пролете внутри камеры сгорания парового котла в течение нескольких долей миллисекунды до момента столкновения, оставаясь в твердом состоянии.

Водород в твердом состоянии с температурой десять кельвинов имеет малую плотность, относительно небольшую механическую прочность и в кинетическом способе не может использоваться в качестве топлива, так как его частицы будут разрушаться в процессе разгона с большим ускорением. Поэтому изотопы водорода связываются с другими легкими элементами в каких-либо химических соединениях, находящихся в твердом состоянии при температурах минус двадцать градусов Цельсия и выше. Соединения должны быть достаточно прочными,

чтобы не разрушаться при ускорениях $\sim 10^8$ м/с². Этим условиям удовлетворяют, например, полиэтилен, лед.

Положительным результатом связывания является повышение концентрации атомов водорода в топливе, почти в полтора раза превышающей их концентрацию в твердом водороде. Более того, входящие в химическое соединение элементы массивнее изотопов водорода и соответственно больше их кинетическая энергия в конце пути разгона. В процессе образования сгустка плазмы часть этой энергии будет передаваться изотопам водорода, повышая их скорость и соответственно температуру этого компонента плазмы. Например, в пучке из частиц льда на долю кислорода приходится ~ 76 % кинетической энергии, на долю дейтерия и трития ~ 24 %. После выравнивания температуры в плазме скорость ядер кислорода снизится на 34 %, скорость ядер трития увеличится на 50 %, скорость ядер дейтерия – на 87 %. Ядра кислорода отдадут более половины своей энергии ядрам водорода. Это влечет за собой существенное увеличение скорости реакции в плотном сгустке плазмы и приводит к более полному сгоранию топлива.

В табл. 1 приведены скорости ядер нескольких элементов при температуре плазмы 10^8 К и температура плазмы, соответствующая скорости ядер 10^6 км/с.

Таблица 1. Скорости и температура плазмы элементов

Элемент	Скорость ядер при температуре 10^8 К, км/с	Температура плазмы при скорости ядер 10^6 м/с, МК
${}_1\text{H}^2$	1120	80
${}_1\text{H}^3$	910	120
${}_3\text{Li}^7$	600	280
${}_4\text{Be}^9$	530	360
${}_5\text{B}^{11}$	480	440
${}_6\text{C}^{12}$	460	480
${}_7\text{N}^{14}$	420	560
${}_8\text{O}^{16}$	390	640

Более массивные ядра играют роль аккумуляторов энергии, передавая часть ее ядрам дейтерия и трития в процессе образования сгустка плазмы. В результате возрастает температура этих реагентов и соответственно увеличивается скорость протекания реакции. В то же время эти ядра, не будучи реагентами, а являясь примесью в реакционной зоне, снижают скорость протекания реакции. Но возрастание температуры реагентов более существенно влияет на увеличение скорости реакции, чем уменьшение их концентрации сказывается на ее снижении.

Ускорительная установка с блоками формирования пучков и блоками их фокусировки образует единое поджигающее устройство. Его длина может быть от 10 до 30 километров в зависимости от принятой схемы разгона пучков топлива. Стоимость установки будет больше стоимости всего остального оборудования электростанции. Поэтому

мощность термоядерной электростанции должна быть не менее 5 ГВт, чтобы затраты на ее строительство окупались в приемлемые сроки. Паровой котел располагается горизонтально, что позволяет изготавливать его длиной до нескольких сотен метров на частоту следования микровзрывов до 100 с^{-1} , и обеспечивать соответствующую тепловую мощность.

Литература

1. **Термоядерные реакции.** // Большой энциклопедический словарь. ФИЗИКА/ гл. ред. А.М. Прохоров. – 4-е изд. – М.: Большая Российская энциклопедия, 1999. – С 758 – 760.
2. **Пат. 2162619. Российская Федерация, МПК(7) G21B1/02.** Кинетический способ управляемого термоядерного синтеза/. Дмитриев М.В; заявитель Ивановский государственный энергетический институт, Дмитриев Михаил Васильевич; патентообладатель Дмитриев Михаил Васильевич; заяв. № 97115790 от 23.09.1997; опублик. 27.01.2001. Бюл. № 3. – 3 с.

УДК 681.515

И.В. ТЕТЕРЕВКОВ, доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: tiv@atp.ispu.ru

Особенности построения систем нечеткого управления

Аннотация. Показан подход к выбору лингвистических переменных в системах нечеткого управления теплоэнергетическими объектами, основанный на учете свойств исполнительных механизмов. Рассмотрена возможность применения пространства состояний в нечетких системах. Рассмотрена проблема настройки нечетких систем.

Ключевые слова: нечеткая логика, выбор лингвистических переменных, пространство состояний.

I.V. TETEREVKOV docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: tiv@atp.ispu.ru

Features of construction of systems of fuzzy logic

Abstract. The approach to a choice linguistic variables in systems of fuzzy logic of heat power objects based on taking into account the properties of executive mechanisms is shown. The possibility of using the state space in fuzzy systems is considered. The problem of tuning fuzzy systems is considered.

Key words: fuzzy logic, choice of linguistic variables, state space.

Одним из перспективных подходов к управлению нестационарными теплоэнергетическими объектами является применение систем нечеткой логики [1]. Переход от количественного к качественному анализу

технологической ситуации позволяет повысить качество управления, особенно в условиях действия параметрических возмущений. Для АСР на базе ПИД-регуляторов структура системы для каждого технологического параметра уже устоялась, а для нечетких систем выбор параметров зависит от мнения разработчика. Анализ основных этапов создания таких систем позволяет сформулировать рекомендации, влияющие на принятие решений по определению набора лингвистических переменных, функций принадлежности и процессу настройки системы.

В процессе создания нечеткой системы одной из основных является проблема выбора лингвистических переменных. В [2] предложен подход, основанный на технологических соображениях, и продемонстрированы его преимущества на примере АСР температуры перегретого пара: замена общераспространенной переменной "вторая производная ошибки управления" на переменную "производная сигнала по температуре за впрыском" позволила получить повышение качества управления. При выборе переменных также необходимо учитывать особенности работы исполнительной части системы управления. Система нечеткой логики с переменными "ошибка управления" и "первая производная ошибки управления" позволяет сформировать нечеткий ПД-закон. Тогда в случае применения наиболее распространенного варианта исполнительного механизма с постоянной скоростью вращения (МЭО) в цепи управления появляется интегратор, преобразующий ПД-закон в ПИ. Большинство теплоэнергетических объектов управления относятся к объектам с самовыравниванием. В этом случае присутствие в законе управления интегрирующей составляющей влияет не только на динамику, но и дает отсутствие статической ошибки.

МЭО имеют два основных недостатка. Во-первых, ограниченная скорость перемещения снижает быстродействие системы. Во-вторых, применение дроссельных регулирующих органов приводит к потерям мощности, особенно при работе на малых нагрузках. Оба недостатка устраняются в случае применения частотных преобразователей, позволяющих перейти от МЭО к позиционерам. Но с точки зрения динамических свойств такие исполнительные механизмы реализуют не интегральное, а пропорциональное или апериодическое преобразование. Исчезновение интегратора в цепи управления приводит к невозможности достижения нулевой статической ошибки, что для большинства объектов теплоэнергетики недопустимо по технологическим соображениям. Тогда лингвистическую переменную "производная ошибки управления" полезно заменить на переменную "интеграл ошибки управления", что позволит добиться отсутствия статизма. Тип исполнительного механизма влияет и на вид функций принадлежности. Так, один из вариантов постановки задачи управления подачей воздуха в топку сводится к минимизации дисперсии расхода воздуха, что связано со снижением расхода электроэнергии на собственные нужды. В этом случае при построении нечеткой системы необходимо учитывать, что

применение нелинейных функции принадлежности приводит к меньшему потреблению электроэнергии на управление исполнительным механизмом, чем в случае линейных функций. Так проведенные исследования показали, что замена треугольных функций принадлежности на экспоненциальные (при одинаковом наборе лингвистических переменных, одном и том же способе логического вывода и настройках нечетких систем, дающих равные степени затухания и динамические ошибки) приводит к снижению электрической мощности практически в два раза.

Одним из способов повышения качества управления является применение пространства состояний. Вполне оправданной представляется попытка построения нечеткой системы с использованием координат состояния в качестве лингвистических переменных. Но необходимо учесть, что существует много способов сформировать пространство состояний, причем координаты могут быть как физическими, так и абстрактными. В первом случае выбор координат на роль переменных полностью определяется технологическими соображениями. Во втором для реализации нечеткой системы требуется применение наблюдателя состояния, что связано с необходимостью полного знания динамических свойств объекта. Но нечеткие системы предназначены для работы в условиях нестационарности, следовательно, модель объекта, являющаяся основой наблюдателя, также должна быть нестационарной. Подобное требование значительно усложняет структуру нечеткой системы и практически лишает проектировщика важного преимущества – простоты создаваемой системы. Работа с абстрактными координатами часто связана с применением одной из канонических форм. Наиболее распространенными являются формы наблюдаемости, управляемости и форма Жордана. Исследования показали бесперспективность применения форм наблюдаемости и управляемости: нечеткие системы на их базе показывают низкое качество управления. Лучше обстоит дело с формой Жордана, приводящей к разбиению структуры объекта на несколько автономных подсистем, каждая из которых вносит свой вклад в формирование выходного параметра. Подобный подход оказался весьма подходящим для применения в системе нечеткой логики: настройка не вызывает трудностей, а качество регулирования – высокое.

Заслуживает рассмотрения и проблема настройки нечеткой системы. Разработчик должен математически формализовать свои представления об управлении. Но эксперт чаще всего способен лишь указать, какие решения по управлению он примет в конкретных технологических ситуациях, то есть формулирует некоторый набор правил. Для дальнейшей формализации необходимо выявить логику получения этих правил, для чего удобно применить нейро-нечеткую систему. При этом нечеткая система представляется в виде нейронной сети, достоинством которой является способность к обучению. Исследования показали, что для создания обучающей выборки достаточно рассмотреть ограниченное количество ситуаций (порядка семи), а в качестве "эксперта" может

выступить и ПИ-регулятор, причем настраиваемая система получит данные о принципах работы только при одном значении режимного фактора, но затем приспособит выработанную логику и к условиям действия параметрических возмущений, то есть обеспечит главное преимущество нечетких систем – робастность. В качестве метода обучения нейронной сети рекомендуется применение генетических алгоритмов, на порядок снижающих время на обучение и обеспечивающих высокую вычислительную устойчивость.

Литература

1. **Методы** классической и современной теории автоматического управления. Учебник в трех томах под ред. К.А. Пупкова. М.: издательство МГТУ им. Баумана, 2000.
2. **Тетеревков И.В.** Задача выбора лингвистических переменных в системах нечёткого управления теплоэнергетическими объектами. Материалы Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XVIII Бенардосовские чтения), II том Теплоэнергетика. – Иваново, 2015.

УДК 519.876.5

А.В. КОНДРАШИН¹, к.т.н., профессор,
Ю.С. КОЛОСОВА², аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

*E-mail: anatoly.kondrashin@yandex.ru*¹, *kolos_yul@mail.ru*²

Специфика математических моделей распределенных объектов в системах реального времени

Аннотация. Рассматривается специфика распределённых моделей, работающих в режиме реального времени, учитывающая особенности варианта их практического применения и требующая математического представления как самой модели, так и её свойств.

Ключевые слова: распределенный объект управления, система реального времени, имитационная модель

A.V. KONDRASHIN, Candidate of Engineering, professor,
Y.S. KOLOSOVA, postgraduate student

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

*E-mail: anatoly.kondrashin@yandex.ru*¹, *kolos_yul@mail.ru*²

Specificity of mathematical models of distributed objects in real-time systems

Abstract. The article considers the specificity of real-time distributed models, which takes into account the peculiarities of the variant of their practical application and requires a mathematical representation of both the model itself and its properties.

Key words: distributed control object, real-time system, simulation model

Практически любой сложный объект автоматизации представляет собой единую взаимосвязанную структуру, состоящую из отдельных пространственно распределённых технологических процессов.

Потребность моделирования таких процессов может быть обусловлена множествами вариантов практического применения. Выделим здесь несколько таких вариантов моделей, отличающихся наличием в них режима реального времени, а именно:

1) модели для стендовых испытаний и наладки автоматизированных систем управления;

2) модели тренажёрных установок, без которых невозможна подготовка оперативного персонала на ТЭС и АЭС;

3) модели, встраиваемые в действующие АСУ ТП и используемые как для получения информации, недоступной для прямого измерения, так и для алгоритмического усовершенствования систем автоматического управления (в частности, в системах, использующих предиктор Смита [1] или в системах управления с внутренней моделью [2]).

Отметим, что все перечисленные типы моделей относятся к классу имитационных. Это следует из явно выраженного назначения моделей.

В этой связи представленные ранее в работе [3] особенности реализации моделей распределённых систем нуждаются в уточнении и в развитии. Это обусловлено не учтёнными требованиями к функциональным особенностям моделей, работающих в режиме реального времени. Каждый из характерных вариантов моделей, перечисленных выше, требует особого решения, зависящего от прикладной специфики. В частности, в моделях первого типа акцент должен быть сделан на качественное имитационное представление процессов во взаимосвязанных участках технологического процесса. Это позволяет выполнить опробование, исследование и наладку как отдельных подсистем управления (так называемых контуров), так и всей сложной (полномасштабной) системы в целом. При этом при создании модели требуется динамическое совершенство, в максимальной степени гарантирующее адекватность модели в области относительно высоких частот (в области резонансных частот контуров). При отработке задач управления переменными режимами дополнительно возникает потребность оперативной структурной коррекции модели, отслеживающей возможные переключения основного и вспомогательного оборудования ТЭС. Этот класс моделей наиболее сложен для реализации, т.к. кроме обеспечения динамической и статической точности должна быть обеспечена качественная синхронизация всех процессов.

В моделях второго типа динамическая точность отодвигается на второй план, сближения свойств моделей в зоне резонансных частот контуров не требуется, акцент переносится на отражение моделью различных квазистатических состояний, возникающих в связи с оперативной (ручной) деятельностью персонала. Реализация этого класса моделей может быть выполнена относительно простыми алгоритмами,

но при жёсткой синхронизации изменения моделируемых технологических параметров и состояний.

Третий тип моделей своим динамическим совершенством должен быть идентичен моделям первого типа, но в отличие от них заведомо строится исходя из конкретных (частных) особенностей, порождённых спецификой локальной задачи управления технологическим участком оборудования. Задача синхронизации различных частных моделей технологических участков в этом случае не актуальна. Однако, кажущееся упрощение требований к такой модели восполняется новыми условиями, являющимися следствием необходимости сопровождать реальный технологический процесс во всех режимах его функционирования (постоянно). С другой стороны, возможность реализации моделей, обеспечивающих весь необходимый диапазон режимов оборудования и требующих оперативной коррекции своих параметров в темпе изменения состояния технологического процесса, упрощается в связи с наличием в действующей АСУ всей необходимой для коррекции параметров модели информации (расходов, давлений, температур, состояний аппаратуры).

В докладе рассматриваются требования к распределённым моделям, учитывающие многие из перечисленных выше обстоятельств. При этом главное внимание уделяется общим концептуальным особенностям, требующим не физического, а математического представления как самой модели, так и её свойств. Следуя [4], представим абстрактную модель в виде:

$$\left(\frac{\partial^k}{\partial t^k} + \sum_{i=1}^k a_i(v,t) \cdot \frac{\partial^{k-i}}{\partial t^{k-i}} \right) \otimes y(v,t) = \left(\sum_{j=1}^k b_j(v,t) \cdot \frac{\partial^{k-j}}{\partial t^{k-j}} \right) \otimes x(v,t),$$

где наряду с традиционной для дифференциальных уравнений переменной t (время) учитываются и переменные V , оказывающие влияние на поведение параметров уравнения a и b . В различных частных случаях требуется конкретное содержательное определение переменной v . В упомянутой выше работе [4] представлено множество частных определений v , в той или иной степени полезных для применения, в том числе и в задачах моделирования процессов в распределённых теплоэнергетических объектах.

К обсуждаемым в докладе свойствам модели относятся:

1) автономность (возможность путём эквивалентных преобразований разделить процессы в многосвязной системе на совокупность не связанных или слабосвязанных процессов);

2) приводимость (возможность нестационарную систему с переменными коэффициентами привести к эквивалентной системе с постоянными коэффициентами);

3) управляемость (возможность с применением модели добиться желаемого динамического поведения реального объекта);

4) наблюдаемость (гарантированность получения с помощью модели информации о поведении физически не наблюдаемых параметров объекта);

5) робастность (параметрическая грубость модели, направленная на достижение необходимой точности прогноза при относительно низкой точности технологических измерений).

Литература

1. **Smith O.J.M.** Close control of loops with dead time // Chemical Engineering Progress. 1957. Vol. 53. p. 217 – 235.
2. **Yesil E., Guzelkaya M., Eksin I.** Internal model control based fuzzy gain scheduling technique of PID controllers // World Automation Congress, 28 June - 1 July 2004. Proceedings. Vol. 17. p. 501- 506
3. **Колосова Ю.С., А.В. Кондрашин** О применении метода конечных элементов к задаче динамического моделирования процессов в распределённых теплоэнергетических объектах управления// Материалы одиннадцатой международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, «Энергия-2016» – Иваново: ИГЭУ, 2016. – В 6 т. Т. 1– С.88-90.
4. **Подчукаев В.А.** Аналитические методы теории автоматического управления. М.: «ФИЗМАТЛИТ», 2002. 316 с.

УДК 621.398-506.1:681.518.5

А.В. КОНДРАШИН, к.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: anatoly.kondrashin@yandex.ru

Перспектива внедрения нейрорегуляторов в системы управления оборудованием ТЭС

Аннотация: обсуждаются структурные и алгоритмические особенности решений, обеспечивающие реальную возможность эффективного применения искусственных нейросетей в системах автоматического управления теплоэнергетическими процессами на ТЭС в нестационарных режимах работы оборудования.

Ключевые слова: нейросети, адаптивное управление, нестационарные режимы.

A.V. KONDRASHIN Candidate of Engineering, professor,

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: anatoly.kondrashin@yandex.ru

The prospect of implementation of neurocontrollers in control system equipment of TPP

Abstract: discusses structural and algorithmic features of solutions that provide a real possibility of effective application of artificial neural networks in automatic control systems of heat power processes at thermal power plants in the transient operation modes of the equipment

Key words: neural networks, adaptive control, non-stationary regimes

Тенденции технического совершенствования систем управления теплоэнергетическим оборудованием ТЭС постоянно находятся в центре внимания специалистов в области автоматизации [1,2]. Но если новые технические средства быстро находят себя на рынке предложений АСУ ТП, то с внедрением новых способов и алгоритмов управления много затруднений [3]. Объекты управления на ТЭС, отличающиеся высокой сложностью оборудования, взаимосвязанностью быстрых и медленных процессов, а также возросшей в последние годы нестационарностью режимов, предъявляют жёсткие требования к качеству и надёжности функционирования автоматических систем управления (АСУ). Классические способы решения этих задач ограничивают маневренность оборудования и не в состоянии удовлетворить новые требования [4].

Не имея возможности здесь обсудить все проблемные обстоятельства, ограничимся классом задач управления, использующих возможности искусственных нейросетей (ИНС). Это обусловлено тем, что во многих практических приложениях нейросетевые методы и алгоритмы решения дали очень хороший технический и экономический эффект [5,6].

Отмечено множество попыток внедрения нейросетевых алгоритмов и в системы управления энергетическими объектами (см., например, работы [6,7]). Наиболее продвинутые решения сфокусированы на решении задач диагностики и прогноза и относятся к режимам электроэнергетического оборудования энергетических систем и электростанций.

Теплоэнергетические же объекты, отличающиеся упомянутыми выше особенностями, создают массу дополнительных сложностей в реальных условиях эксплуатации. Более того, консерватизм, а порой и неосведомлённость руководителей энергетических предприятий зачастую коррелируют со слабой заинтересованностью разработчиков АСУ ТП («нас не просят, а мы и не предлагаем»). На это накладывается и недостаточная профессиональная подготовка сотрудников компаний, внедряющих АСУ ТП [3].

Ниже рассматривается один из способов преодоления сложностей разработки и внедрения САУ для теплоэнергетического оборудования. На рис. 1 представлены 2 основных распространённых принципа организации автоматических регуляторов с использованием ИНС.

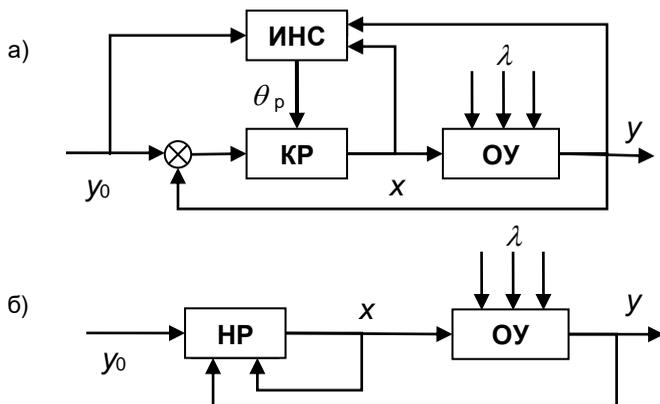


Рис. 1. Распространённые принципы применения нейросетей в системах автоматического регулирования

В варианте (а) для управления объектом (ОУ) используется классический регулятор (КР) с традиционным типом алгоритма (ПИ или ПИД). ИНС отводится при этом роль адаптирующего элемента, обеспечивающего определение параметров настройки регулятора θ_p в процессе наладки системы ($\theta_p = \text{const}$) или в процессе нормальной эксплуатации ($\theta_p = \theta_p(t)$). В варианте (б) традиционного регулятора нет, а его роль передаётся нейрорегулятору (НР), функционирующему в режиме реального времени времени (в темпе технологического процесса)

В качестве НР чаще всего применяются двухслойные ИНС перцептронного типа (ИНС ПТ), отличающиеся простотой реализации и эффективностью процессов обучения. Вектор входных переменных для регулятора формируется текущим значением управляемой переменной $y(k)$ и предысторией процесса $y(k-1)$, $y(k-2)$, В общем случае можно использовать и предысторию управляющего воздействия $x(k-1)$, $x(k-2)$.

Важно заметить, что ИНС ПТ фактически является статическим нелинейным регулятором. В нём нет характерного для КР и обязательно в случае управления объектами с самовыравниванием процесса интегрирования. А это означает, в переходных процессах в таких объектах будут возникать статические ошибки управления

Рис. 2 представляет иную концепцию применения ИНС в задачах управления на ТЭС, в которой ПИ-регулятору отведена роль вспомогательного, устраняющего статизм в системе и обеспечивающего процесс управления в случае диагностируемых отказов НР.

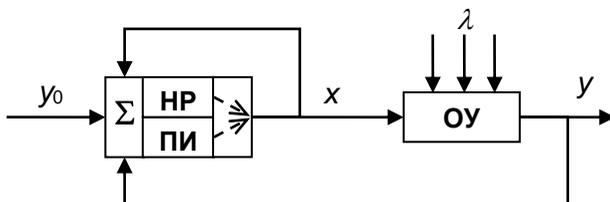


Рис. 2. Перспективный принцип применения ИНС в САУ

При наличии встроенного в НР режима обучения и относительно низких требованиях к качеству функционирования робастного ПИ-регулятора внедрение и сопровождение САУ с таким регулятором не требует высокой квалификации персонала.

Литература

5. **Кондрашин А.В.** Резервы повышения эффективности эксплуатации теплоэнергетического оборудования ТЭС при внедрении современных АСУТП // Материалы IX форума «Современные технологии промышленной автоматизации», Новосибирск, 2011.
6. **Кондрашин А.В.** О состоянии процессов внедрения АСУ ТП НА ТЭС и о перспективах развития на базе современных ПТК // Материалы международной научно-технической конференции «XVIII Бенардосовские чтения» - Иваново: ИГЭУ, 2015. - С.61-64.
7. **Круглый** стол о причинах недостаточно эффективного построения и эксплуатации систем автоматизации// Автоматизация в промышленности, 2012, №2, с. 38-47.
8. **Кондрашин А.В.** Возможности повышения маневренности оборудования ТЭС при внедрении современных АСУ ТП// Сб. трудов международной НТК «Состояние и перспективы развития электротехнологии», Иваново: ИГЭУ, т..2, 2011, С.140-142.
9. **Галушкин А.И.,** Симоров С.Н. Нейросетевые технологии в России (1982-2010) – М.: Горячая линия-Телеком, 2011, 316 с.
10. **Горбунов В.А.** Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2011.– 476 с.
11. **Пономарёв В.С.,** Финаев В.И. Применение адаптивных регуляторов на основе нейронных сетей в энергетике // Известия ЮФУ. Технические науки, 2008, №7, с. 164-169.

УДК 681.586.67:621.311.25:621.311.22

А.В. ГУСАРОВ, к.т.н., главный специалист группы метрологии

Московский филиал «Центратомтехэнерго» АО «Атомтехэнерго»
115432, г. Москва, Проектируемый проезд 4062, д. 6, строение 2
E-mail: avsvgt6063@mail.ru

Программный комплекс для расчета метрологических характеристик термопар

Аннотация: разработан программный комплекс, выполняющий в соответствии с ГОСТ Р 8.585–2001 расчет и представление в виде таблиц и графиков метрологических характеристик термопар.

Ключевые слова: температура, термопара, номинальная статическая характеристика преобразования, пределы допускаемых отклонений, поверка.

A.V. GUSAROV Candidate of Engineering,
main technician of the metrology group

Moscow Branch «Centeratomtechenergo» JSC «Atomtechenergo»
115432, Moscow, Proektiruemyy proezd 4062, 6, building 2
E-mail: avsvgt6063@mail.ru

The program complex for the metrological thermocouple characteristic calculation

Abstract: The program complex forming tables and curves of the metrological thermocouple characteristics in accordance with the State branch standard of the Russian Federation No. 8.585–2001 was launched.

Key words: temperature, thermocouple, nominal static characteristic of conversion, limits of permissible deviations, verification.

ГОСТ Р 8.585–2001 «ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования» [1] содержит большой объем сведений о тринадцати типах термопар (ТП): таблицы номинальных статических характеристик (НСХ), формулы расчета (полиномиальные зависимости высоких порядков) НСХ и обратных НСХ (ОНСХ), формулы расчета приведенных ко входу ТП пределов допускаемых отклонений термоэлектродвижущей силы (ТЭДС) от НСХ, что создает известные неудобства при работе с подобного рода документами. Для более комфортного использования [1] автором разработан программный комплекс (ПК), позволяющий существенно сократить время поиска необходимых сведений о ТП.

Приложение для запуска и работы ПК написано на языке Object Pascal в среде разработки приложений Delphi (версия 7.0). Соответствующий ехе-файл занимает память объемом 2,02 МБ. После запуска ПК на экран дисплея выводится экранная форма (ЭФ) «Номинальные статические характеристики термопар (ГОСТ Р 8.585–2001)», представленная на рис. 1. В верхней части ЭФ расположена панель с кнопками

«Описание программы», «Просмотр текста ГОСТ Р 8.585-2001», «Сведения об авторе».

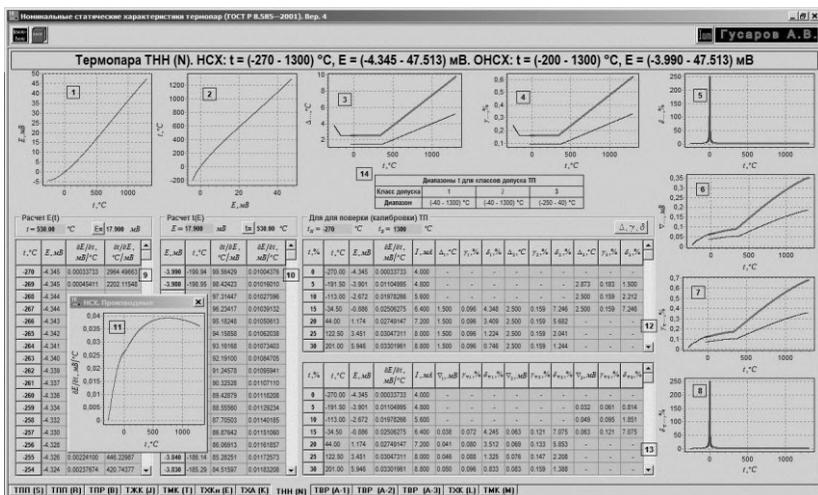


Рис. 1. Экранная форма «Номинальные статические характеристики термопар (ГОСТ Р 8.585–2001)»

ЭФ содержит вкладки с именами «ТПП (S)», «ТПП (R)», «ТПР (B)», ..., «ТМК (M)». Просмотр данных по ТП конкретного типа осуществляется выбором одноименной вкладки.

ПК рассчитывает термоэлектродвижущую силу E (в мВ) термопары по заданным значениям температуры (в °С) горячего спая t (для HСХ), а также, в отличие от [1], следующие величины:

- температуру горячего спая t по заданным значениям E (для ОНСХ);
- Δ – пределы допускаемых отклонений E от HСХ, приведенные ко входу ТП, °С;
- γ и δ – соответственно приведенные и относительные значения Δ (нормирующим значением при расчете γ выбран диапазон измерений t), %;
- производные $\delta E/\delta t$, мВ/°С; $\delta t/\delta E$, °С/мВ;
- ∇ – пределы допускаемых отклонений E от HСХ, мВ;
- γ_V и δ_V – соответственно приведенные и относительные значения ∇ (нормирующим значением при расчете γ_V выбран диапазон изменения E), %.

В верхней части каждой вкладки расположено окно в рамке, в которое выводятся обозначение ТП, диапазоны изменения t и E для HСХ и ОНСХ.

Для каждой типа ТП на одноименной вкладке выводятся следующие графики и таблицы, обозначенные на рис. 1 цифрами в прямоугольных рамках:

- 1, 2 – соответственно графики НСХ и ОНСХ;
- 3, 4, 5 – соответственно графики зависимостей Δ , γ , δ от t ;
- 6, 7, 8 – соответственно графики зависимостей ∇ , γ_{∇} , δ_{∇} от t ;
- 9 – таблица значений E , $\delta E/\delta t$ и $\delta t/\delta E$ в зависимости от t ;
- 10 – таблица значений t , $\delta t/\delta E$ и $\delta E/\delta t$ в зависимости от E ;
- графики зависимостей $\delta E/\delta t$ и $\delta t/\delta E$ от t , E (например, на рис. 11);
- 12 – таблица значений Δ , γ , δ в выбранных по диапазону измерений термоэлектрического преобразователя точках;
- 13 – таблица значений ∇ , γ_{∇} , δ_{∇} в выбранных по диапазону измерений термоэлектрического преобразователя точках;
- 14 – таблица с диапазонами t , в которых [1] устанавливаются значения Δ .

Содержимое графиков 1, 2, 11 и таблиц 9, 10 при работе с ПК не меняется.

Содержимое графиков 3–8 и таблиц 12, 13 определяется диапазоном значений t . Нижний t_n и верхний t_b пределы диапазона задаются пользователем в окне "Для поверки (калибровки) ТП". Изменение содержимого графиков 3–8 и таблиц 12, 13 после ввода значений t_n и t_b осуществляется нажатием кнопки " Δ , γ , δ ".

Данные, которые могут потребоваться при поверке (калибровке) термоэлектрических преобразователей, оформлены в виде табл. 12, 13. В указанные таблицы для точек 0 %, 5 %, 10 %, ..., 100 % от диапазона измерений t выводятся значения следующих величин:

- t и E ;
- силы тока I на выходе термоэлектрического преобразователя с унифицированным выходным сигналом (4 – 20) мА;
- Δ , γ , δ (таблица 12), ∇ , γ_{∇} , δ_{∇} (таблица 13).

Индексы 1, 2, 3 у переменных Δ , γ , δ , ∇ , γ_{∇} , δ_{∇} в колонках таблиц 12, 13 соответствуют классам допусков по таблице В.1 из [1].

Диапазоны изменения t для формул расчета НСХ, ОНСХ термопар, формул расчета Δ и диапазоны измерения t термоэлектрических преобразователей могут не совпадать, в связи с чем отклонения от НСХ для отдельных участков диапазонов измерений могут быть не определены. Для этих случаев в соответствующие ячейки таблиц 12, 13 заносятся символы «—».

ПК прост для ознакомления и последующего использования.

ПК может быть использован при проектировании информационно-измерительных подсистем АСУ ТП; при оценке точности измерения температур с использованием термоэлектрических преобразователей; при поверке (калибровке) термоэлектрических преобразователей и измерительных каналов с термоэлектрическими преобразователями.

Литература

1. ГОСТ Р 8.585–2001 «ГСИ. Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования».

Подсекция

«ТЕХНОЛОГИЯ ВОДЫ И ТОПЛИВА НА ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ»

УДК 502.34

Н.А. ЕРЕМИНА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина

153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

E-mail: zavkaf@xste.ispu.ru

О наилучших доступных технологиях

Аннотация: рассмотрены новые требования законодательства Российской Федерации в области обеспечения нормативов допустимого воздействия на окружающую среду и внедрения наилучших доступных технологий при осуществлении деятельности, связанной с негативным воздействием на атмосферный воздух.

Ключевые слова: наилучшие доступные технологии, окружающая среда, выбросы вредных веществ.

N.A. EREMINA, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University

153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

E-mail: zavkaf@xste.ispu.ru

On the best available technologies

Abstract: the new requirements of the legislation of the Russian Federation in the area of ensuring standards of permissible impact on the environment and the implementation of best available technologies in the implementation of activities associated with the negative impact on the atmosphere.

Keywords: best available techniques, environment, emissions of harmful substances.

В 2014 году внесены изменения во многие законодательные акты, касающиеся природоохранной деятельности в РФ, в том числе в Федеральный закон «Об охране окружающей среды» [1], в котором наряду с прежними нормативами допустимого воздействия на окружающую среду (ОС) были установлены наилучшие доступные технологии (НДТ), применение которых направлено на комплексное предотвращение и (или) минимизацию негативного воздействия на ОС.

Внедрением наилучшей доступной технологии юридическими лицами или индивидуальными предпринимателями признается ограниченный во времени процесс проектирования, реконструкции, технического перевооружения объектов, оказывающих негативное воздействие на ОС, установки оборудования, а также применение технологий, которые описаны в опубликованных информационно-технических справочниках по НДТ [1].

К концу 2016 года были разработаны и утверждены Приказами Росстандарта 12 подобных справочников, в том числе информационно-технический справочник «Очистка выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух при производстве продукции (товаров), а также при проведении работ и оказании услуг на крупных предприятиях» (ИТС 22-2016) [2]. Данный справочник носит методический характер и содержит обобщенную информацию, сведения общего характера, общие подходы к межотраслевым технологиям, техническим и управленческим решениям по очистке выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух.

ИТС 22-2016 подлежит применению на объектах, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду (НВОС) и относящихся к добыче полезных ископаемых, обрабатывающим производствам, а также к объектам по обеспечению электрической энергией, газом и паром, кондиционированию воздуха.

Критериями отнесения технологических процессов, оборудования, технических способов, методов очистки вредных (загрязняющих) веществ к НТД были выбраны следующие:

- промышленное внедрение на двух и более промышленных объектах, оказывающих негативное воздействие на ОС;
- наименьший уровень НВОС в расчете на единицу времени или объем производимой продукции либо соответствие другим показателям воздействия на ОС;
- экономическая эффективность внедрения и эксплуатации;
- период внедрения.

Подразумевается, что все технологии, которые могут быть применены на действующих объектах, также могут быть использованы на модернизируемых и новых. При этом кроме специально оговоренных случаев, при разработке справочника подразумевалось, что на новых предприятиях могут быть внедрены все указанные НТД. Поскольку на момент формирования справочника достоверная информация по внедрению приведенных в нем НТД практически отсутствовала (не более 4 % рассмотренных анкет, поступивших от предприятий), выводы о возможности внедрения НТД на действующем и/или модернизируемом предприятии делались на основе экспертных оценок специалистов соответствующих отраслей.

В сборнике приведены описания универсальных НТД, в том числе организационно-управленческого характера, энерго- и ресурсосбережения, производственного экологического контроля, предотвращения негативного воздействия обработки отходящих газов на ОС, предотвращения и сокращения образования запахов и шумового воздействия. Всего приведено около 30 технологий.

Большой раздел справочника посвящен НТД, направленным на оптимизацию процессов очистки выбросов в атмосферный воздух от основных вредных (загрязняющих) веществ, в том числе твердых ча-

стиц (пыли), взвешенных веществ, соединений серы, азота, летучих органических соединений.

Так, например, для сокращения и предотвращения образования выбросов твердых частиц (пыли), взвешенных веществ наилучшей доступной технологией является сокращение поступления в выбросы этих компонентов с помощью любого из перечисленных методов:

а) осуществление первичных мероприятий с учетом условий применимости: использование топлива с более низкой зольностью; применение предварительной очистки топлива (угля); оптимизация процесса горения топлива; использование замкнутых или закрытых систем для транспортирования твердого топлива и сыпучих грузов; применение технологий пылеподавления, включая технические решения с использованием насыщенного пара;

б) применение камер гравитационного осаждения для удаления крупных частиц (более 20 мкм) на этапе предварительной очистки дымовых газов;

в) применение циклонов на этапе предварительной очистки дымовых газов для удаления абразивных частиц, позволяющее увеличить срок эксплуатации другого газоочистного оборудования;

г) применение электрофильтров для удаления крупных частиц более 1 мкм;

д) применение тканевых фильтров для удаления мелких и ультра-мелких частиц;

е) применение мокрых газоочистителей для одновременного улавливания оксидов серы и пыли;

ж) применение электростатических фильтров, если тканевые фильтры не могут использоваться из-за высокой влажности сажевых аэрозолей.

Подход «а» подлежит применению на действующих, модернизируемых и новых объектах при условии технологической возможности и ограничений экономического и социального характера. Подходы «б»-«ж» подлежат применению на модернизируемых и новых объектах.

В соответствии с № 96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (ст. 30) «юридические лица и индивидуальные предприниматели, имеющие стационарные источники, обязаны ... внедрять наилучшие доступные технологии, малоотходные и безотходные технологии в целях снижения уровня загрязнения атмосферного воздуха».

В целях стимулирования юридических лиц и индивидуальных предпринимателей, осуществляющих хозяйственную и (или) иную деятельность, к проведению мероприятий по снижению НВОС и внедрению НТД при исчислении платы за НВОС к ставкам такой платы с 1 января 2020 г. будет применяться коэффициент «0» за объем или массу выбросов загрязняющих веществ, сбросов загрязняющих веществ в пределах технологических нормативов после внедрения НТД на объекте.

Литература

1. **Федеральный** закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ (ред. от 03.07.2016) «Об охране окружающей среды» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2017). – Режим доступа: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=205778&fld=134&dst=274.0&rnd=0.17365259117513188#0>
2. **ИТС 22-2016**. Очистка выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух при производстве продукции (товаров), а также при проведении работ и оказании услуг на крупных предприятиях. – Режим доступа: http://www.gost.ru/wps/wcm/connect/3f8087804fc210879680fecdf72725e0/ITS_22-2016.pdf?MOD=AJPERES

УДК 621.311

Е.А. КАРПУЧЕВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: karpuchev3108@bk.ru

Исследование состава отложений инертного материала IP-4. Определение влияния отложений на процесс обессоливания

Аннотация: выполнен анализ отложений инертного материала верхней камеры противоточного анионитного фильтра. Определен количественный состав отложений и их влияние на качество вырабатываемой обессоленной воды.

Ключевые слова: отложения, инертный материал, противоточная технология обессоливания, гуматы железа, восстановительная обработка.

Е.А. KARPUCHEV Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: karpuchev3108@bk.ru

Investigation of composition of inert material IP-4. Determination of influence deposits on desalination

Abstract: Analysis of the upper chamber is made of an inert material deposits anionite counter filter. It determines the number of deposits and their impact on the quality of the produced desalinated water.

Key words: deposits, inert material, counter desalination technology, humates iron, replacement treatment.

Водоподготовительная установка (ВПУ) производительностью 500 м³/ч, располагающаяся на территории ПАО «Северсталь», состоит из двух горизонтальных осветлителей, пяти механических фильтров, трёх блоков противоточных двухкамерных ионитных фильтров по технологии «Schwebebet». Н-катионитный фильтр по ходу рабочей среды загружен слабокислотным катионитом Purolite C-104 и сильнокислотным катионитом Purolite C-104. ОН-анионитный фильтр по ходу рабочей среды загружен слабоосновным анионитом Purolite A-847 и сильноос-

новым анионитом Purolite A-400. Во всех камерах фильтров предусмотрена загрузка инертного материала марки Purolite IP-4.

Ионообменный материал в течение всего срока эксплуатации подвержен значительному «отравлению» вследствие ухудшения показателей качества осветленной воды, а именно высоких значений массовой концентрации соединений железа и окисляемости.

Технология восстановительной обработки ионообменного материала существует, а вопросы возможности и необходимости применения данной технологии на ионообменных материалах указанного производителя рассмотрены в источнике [1].

При сервисном обслуживании ОН-анионитного фильтра выявлено значительное загрязнение инертного материала IP-4 верхней камеры ОН-анионитного фильтра бурыми отложениями (рис.1). Причем инертный материал остальных камер блока обессоливания аналогичному загрязнению не подвержен.



Рис. 1 Фотографии инертного материала IP-4 с увеличением в 25 раз: (слева – незагрязненный, справа – загрязненный)

Характер и причины образования отложений, а также их влияние на технологический процесс и качество вырабатываемой обессоленной воды изучению не подвергались.

Выполнен лабораторный анализ пробы загрязнённого инертного материала на предмет растворения отложений в неорганических кислотах и щелочах, а также количественного состава загрязнителя.

По результатам химической очистки инертного материала и анализа отложений получены следующие результаты:

- отложения не растворимы в щелочи «NaOH»;
- отложения растворимы в концентрированной соляной кислоте.

Подогрев и последующее кипячение пробы инертного материала с отложениями в концентрированной соляной кислоте положительно влияет на скорость растворения примесей;

- основным загрязнителем являются соединения железа. Содержание соединений железа в пересчёте на Fe_2O_3 составило 58,1 %.

В дополнение к анализу отложений определены потери при прокаливании.

По итогам анализа получены следующие результаты:

- потери при прокаливании (П.П.П.) отложений составили 36,3 %;
- удельная загрязненность инертного материала составила 0,0228 г/г;

- в состав отложений входят в основном соединения железа;
- полученный результат определения потери при прокаливании свидетельствуют о наличии в составе отложений органических соединений, в частности наиболее устойчивых к разрушению – гуматов железа.

На основании полученных результатов сформулированы основные выводы и рекомендации по удалению указанных отложений:

- степень достоверности полученных результатов подтверждается условием выполнения анализов с использованием общепринятых методик [2]. Относительная погрешность конечного результата составила 5,6 %. Указанное значение погрешности может быть обусловлено содержанием в отложениях гигроскопической влаги, не вошедшей в прокаленную массу по причине её испарения;

- отложения образуются в камере ионитного фильтра, загруженного высокоосновным анионитом Purolite A-400, который в большей степени подвержен эффекту «отравления» [1]. «Отравление» ионитов в основном происходит гуматами, в том числе и гуматами железа, которые в свою очередь задерживаются как в ионите, так и на поверхности инертного материала;

- гуматы железа с течением времени «стареют» с образованием более простых соединений и накапливаются в объеме камеры фильтра и фильтрующей загрузки. Органическая часть гуматов железа растворяется и выводится из соединений при регенерации анионитных фильтров щелочью, что и обуславливает их меньшее содержание в составе отложений;

- негативного влияния на технологический процесс ионирования и качество получаемой обессоленной воды указанные отложения не оказывают;

- отложения образуются не только на поверхности инертного материала, но и на фильтрующих элементах (колпачках) верхней дренажной системы. Это в свою очередь может привести в долговременной перспективе к уменьшению пропускной способности фильтрующего элемента и как следствие сокращению располагаемой производительности фильтра;

- одним из технологических способов очистки инертного материала может быть его обработка подогретым раствором соляной кислоты, при этом крепость раствора должна быть не менее 15 %. Обязательным условием отмывки является перемешивание инертного материала в процессе очистки, путем механического перемешивания или рециркуляции моющего раствора.

Литература

1. А. Я. Сорокина, Е. Г. Ухалова, А. Ю. Будаева, Е.А. Карпычев. Исследование эффективности восстановительной обработки высокоосновного анионита

Purolite A-400. Материалы междунар. науч.-техн. конф. «XVIII Бенардосовские чтения» «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии». Иваново, 27-29 мая 2015 г. В 2 т. Т 2 / Под ред. С. В. Тарарыкина, В. В. Тютикова, В. А. Шуина и др. – Иваново: ФГБОУ ВПО «Иван. гос. энерг. ун-т им. В. И. Ленина», 2015 – 339 с. С.78-81.

2. Ю. Ю. Лурье. Унифицированные методы анализа вод. Издание второе исправленное. Под ред. Ю. Ю. Лурье. Изд-во «Химия». М. 1973 г.

УДК 621.187

А.Б. ЛАРИН¹, к.т.н., доцент, А.Я. СОРОКИНА², инженер

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru¹, nasy_0307@mail.ru²

Измерение pH питательной воды и пара современных энергоблоков

Аннотация. Разработан макет промышленного анализатора АПК «Лидер», предназначенного для измерения показателя pH и концентрации примесей в водах типа конденсатов, и создана методика калибровки промышленных стеновых pH-метров с использованием аммиачных и углекислотных буферных растворов.

Ключевые слова: измерение показателя pH, питательная вода энергоблоков, измерение удельной электропроводности.

A.B. LARIN, PHD, associate Professor
A.Ya. SOROKINA, engineer

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru¹, nasy_0307@mail.ru²

Measurement of the pH of the feedwater and steam of modern power plants

Abstract. The prototype of the industrial analyzer of the agrarian and industrial complex "Leader" intended for measurement of an indicator pH and concentration of impurity in waters like condensates is developed and the technique of calibration of industrial bench pH-meters with use of ammoniac and carbon dioxide buffer solutions is created.

Key words: measurement of an indicator pH, feedwater of power units, measurement of specific conductivity.

Ужесточение норм качества питательной воды и пара энергетических котлов ТЭС, включая котлы-утилизаторы ПГУ, и парогенераторов АЭС [1-3] повышает надежность водно-химического режима энергоблоков, однако, ставит новые задачи там, где прежде не возникало проблем. Так, измеренные значения pH могут значительно отличаться от

истинных значений. Обычная калибровка рН-метров по стандартным буферным растворам оказывается неправомерной, поскольку рабочая среда сильно отличается от калибровочных растворов по уровню концентраций.

Впервые такие проблемы обозначились на блоках СКД с прямоточными котлами [4]. Решение искали путем конструктивных изменений рН-метрического датчика, и это дало положительные результаты. Однако, в сверхчистой среде водного теплоносителя современных энергоблоков ранее приняты мер становится недостаточно.

Повышение надежности и достоверности измерений рН в питательной воде и конденсате пара энергоблоков может идти двумя путями. Во-первых, возможен переход на косвенное измерение рН по измерениям удельной электропроводности охлажденных прямой (χ) и Н-катионированной (χ_{H}) проб воды. Во-вторых, возможна калибровка штатных рН-метров непосредственно в условиях рабочей среды дозированием растворов реагентов, не изменяющих значительно свойства потока пробы и дающих достоверные значения рН.

Разработана методика и способ, обеспечивающие достоверное определение рН по измерениям электропроводности во всем возможном диапазоне от 6,0 до 10,0, как в присутствии подщелачивающего агента, так и без него [5]. Способ основан на решении математического описания ионных равновесий в потоке пробы конденсата или питательной воды, проходящей через кондуктометрические датчики до Н-катионитовой колонки (χ) и после нее (χ_{H}).

Способ реализован авторами в конструкции нового автоматического анализатора примесей конденсата и питательной воды АПК «Лидер» и проверен в условиях эксплуатации на Петрозаводской ТЭЦ и Костромской ГРЭС. Алгоритм анализатора АПК «Лидер» усложнен условием проверки достоверности измерений удельной электропроводности и учетом содержания минеральных примесей с расчетом концентраций аммиака, ионов натрия и хлоридов. Анализатор обеспечивает калибровку измерений рН по стандартным растворам непосредственно в условиях потока пробы конденсата или питательной воды в диапазоне рН от 6,0 до 10,0.

Результаты испытаний опытно-промышленного образца АПК «Лидер» на Петрозаводской ТЭЦ и Костромской ГРЭС приведены в табл. 1.

Анализ результатов промышленных испытаний показал, что анализатор АПК «Лидер» дает косвенные измерения значений рН, отличающиеся от измерений стационарными рН-метрами в пределах 0,05-0,10 ед. рН, что можно считать вполне обоснованным.

Второй путь повышения достоверности измерений рН в сверхчистых средах связан с разработкой методики калибровки рН-метров непосредственно в условиях рабочей среды с дозировкой реагентов, не изменяющих существенно характер этой среды.

Таблица 1. Данные измерений системы автоматического химического контроля ТЭС и опытного образца АПК «Лидер» при контроле качества питательной воды (п.п. 1-3,5-7) и обессоленной добавочной воды (п.п. 4,8)

Объект	№	Система мониторинга ТЭС				Данные АПК «Лидер»					
		χ , мкСм/ см	$\chi_{Н}$, мкСм/ см	pH	$[NH_3]$, мкг/д м ³	χ , мкСм/ см	$\chi_{Н}$, мкСм/ см	pH	$[NH_3]$, мкг/д м ³	$Na^{ср}$, мкг/д м ³	$[Cl]$, мкг/д м ³
Петрозаводская ТЭС	1	4,07	0,205	9,11	501	4,09	0,222	9,17	492	8,4	12
	2	4,10	0,144	9,15	495	4,13	0,238	9,17	499	9,0	13
	3	3,81	0,150	9,11	451	3,82	0,256	9,14	445	9,7	14
	4	0,559	-	8,28	-	0,557	0,134	8,31	-	57	8
Костромская ГРЭС	5	0,692	0,106	8,00	81	0,689	0,183	7,98	50	6,8	10
	6	0,702	0,105	7,98	83	0,696	0,163	8,00	51	6,0	9
	7	0,698	0,102	7,97	83	0,692	0,161	8,00	50	5,6	8
	8	0,220	-	6,51	-	0,218	0,388	6,55	-	32	33

В лаборатории кафедры Химии и химических технологий в энергетике ИГЭУ проведено исследование, целью которого был поиск состава и концентрации буферных растворов для калибровки автоматических рН-метров, работающих на проточных пробах сверхчистого водного теплоносителя. Для этого был использован стенд мембранно-ионообменной технологии, позволяющий получить обессоленную воду с удельной электропроводностью $\chi = 0,08 - 0,10$ мкСм/см. Для обеспечения калибровки рН-метра в диапазоне $pH = 6,0 \div 10,0$ при изменении электропроводности пробы от 0,1 до 10,0 мкСм/см исследовались растворы аммиака, аммиака в смеси с хлоридом аммония, гидрокарбоната натрия и смеси гидрокарбоната натрия с угольной кислотой. Калибровочный раствор дозировался в поток пробы обессоленной воды в соотношении 1:30 и поступал на датчик рН-метра. Параллельно рН-метру проба воды поступала на анализатор АПК «Лидер».

Проведенное исследование показало возможность калибровки стендовых автоматических рН-метров дозировкой аммиака в поток охлажденной пробы конденсата или питательной воды с измерением рН в диапазоне $9,15 \div 9,35$ по величине удельной электропроводности в диапазоне $\chi = 4-6$ мкСм/см.

Для калибровки рН-метра вблизи нижней границы измерений, принятой за 6,0, можно использовать углекислотный буферный раствор, содержащий $NaHCO_3$, H_2CO_3 , $NaCl$ в соотношении 1:1:1.

Если проба воды содержит щелочные агенты, например, аммиак, то для калибровки используется проба, предварительно прошедшая Н-катионитовый фильтр (Н-колонку). Такими колонками комплектуются все кондуктометры.

Проведенное исследование показало возможность обоих путей повышения достоверности измерений рН автоматическими анализаторами в условиях сверхчистого водного теплоносителя.

Литература

1. **СТО 70238424.27.100.013-2009.** Водоподготовительные установки и водно-химический режим ТЭС. Условия создания. Стандарт организации. – М.: НП «ИНВЭЛ» - 2009 – 93 с.
2. **Guidelines** for feed water, boiler water and steam quality for power plants // Industrial Plants VGB-R 450 Le. 2nd ed., 2004; VGB-S-010-T-00. 3rd ed. 2011.
3. **СТО 1.1.1.07.003.0818-2016.** Водно-химические режимы второго контура АЭС с ВВЭР-1000. Нормы качества рабочей среды и средства их обеспечения. М.: АО «Концерн Росэнергоатом». 2016.
4. **РД 34.37.308-90.** Методические указания по определению рН питательной воды прямоточных котлов СКД в пределах от 8,0 до 10,0. М.: СПО «ОРГРЭС». 1991.
5. **Патент РФ № 2573453.** Способ определения рН малобуферных предельно разбавленных водных растворов типа конденсата / Ларин Б.М., Ларин А.Б., Сорокина А.Я., Киет С.В. Опубликовано: 20.01.2016. Бюл. №2.

УДК 621.187

Б.М. ЛАРИН¹, д.т.н., профессор, Е.Г.УХАЛОВА², инженер

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: admin@xxte.ispu.ru¹, lena.uxalova@mail.ru²

Проблемы энерго- и ресурсосбережения в теплоэнергетике

Аннотация. Энерго- и ресурсосбережение на тепловых электростанциях может обеспечиваться рядом технологических мероприятий, включая оптимизацию графика выработки электрической энергии, модернизацию оборудования и повышения КПД энергоблоков, перевод старых ТЭЦ на пониженные параметры.

Ключевые слова: энергосбережение на ТЭС, ресурсосбережение на ТЭС, теплоэнергетическое оборудование.

B.M. LARIN, Doctor of Engineering, professor,
E.G. UHALOVA, engineer

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: admin@xxte.ispu.ru¹, lena.uxalova@mail.ru²

Problems power - and resource-saving in power system

Abstract. Energy and resource saving in thermal power plants can be provided by a number of technological measures, including optimization of the schedule for generating electric power, upgrading equipment and increasing the efficiency of power units, transferring old CHP plants to reduced parameters

Keywords: energy saving on thermal power plant, resource-saving on thermal power plant, the heat power equipment.

Энерго- и ресурсосбережение на действующих ТЭС можно определить в виде следующих задач:

- оптимизация графика электрической нагрузки;
- перевод старых энергетических котлов на сниженные параметры;
- модернизация теплоэнергетического оборудования и режимов его эксплуатации.

Целью этих и подобных мероприятий является, в конечном счете, снижение удельного расхода топлива. Нередко, одновременно с этим реализуются мероприятия по сокращению эксплуатационных затрат, включая затраты на ремонты и эксплуатационный персонал. Целью таких мероприятий является, как правило, повышение прибыли энергетического предприятия.

1. Оптимизация графика электрической нагрузки.

С целью определения динамики изменения нормируемых и диагностических показателей ВХР в течение одних суток сотрудниками ИГЭУ был проведен контроль качества конденсатов, питательной воды и пара энергоблока с периодичностью 2 часа.

Из рис. 1 видно, что энергоблок в период испытаний работал с переменной нагрузкой: от 110 МВт днем 11 ноября до 70 МВт – ночью с 11 на 12 ноября с последующим набором мощности до 100-110 МВт днем 12 ноября.

Опасность подобных явлений возрастает в условиях современной эксплуатации барабанных котлов ТЭЦ, характеризующейся значительными измерениями нагрузки и паропроизводительности в течение одних суток. [1]

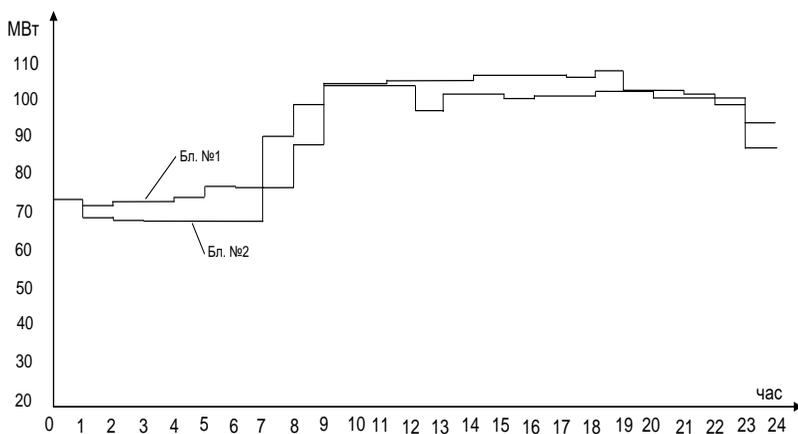


Рис. 1. Генерация электрической энергии блоками №№ 1, 2 за 11 ноября

Такой график электрической нагрузки ведет к резким изменениям теплотехнических параметров теплоносителя по тракту энергоблока. Так, расход питательной воды на котле изменялся от 430 т/ч днем 11 ноября до 260 т/ч ночью с 11 на 12 ноября. Температура питательной воды изменялась в эти периоды от 240 °С до 130 °С, что свидетельствует об уменьшении теплообмена в системе регенеративного подогрева (ПНД-ПВД), например, в результате отключения ПВД.

2. Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования барабанных котлов ($P_6=9,8$ МПа)

Реструктуризация электроэнергетики и усиление рыночных отношений приводит к вытеснению с ФОРЭМ старых ТЭЦ с параметрами 10 МПа и ниже. Оборудование таких ТЭЦ имеет низкие показатели по выработке электроэнергии даже в теплофикационном режиме и неконкурентоспособно. Между тем количество таких ТЭЦ в городах центральной части России весьма велико, а значение их в теплоснабжении промышленных потребителей трудно переоценить. Поэтому на ближайшие 5-10 лет актуальным является определение роли и места таких ТЭЦ в энергетике страны. Решение должно быть таким, чтобы до момента технического перевооружения рассматриваемых ТЭЦ их работа оставалась прибыльной и надежной.

Поэтому необходимо предусматривать возможность работы до демонтажа морально устаревшего оборудования, разрабатывая способы и режимы его эксплуатации, сохраняющие надежность и обеспечивающие высокие экономические показатели. Одним из таких способов может стать перевод части энергетических котлов ТЭЦ с параметров 10 МПа и 510 °С на 4 МПа и 440 °С, что при повышении надежности позволит существенно снизить расход электроэнергии на привод питательных насосов.

Анализ проведен с использованием специально разработанной расчетной модели котла и программы «ТРАКТ». Формирование банка исходных данных осуществлялось с учетом продолжительности службы котлов ТП-170 и отклонения режимных характеристик от нормативных значений [2, 3].

В исследованиях [3] определялись оптимальные условия эксплуатации котла при $p_{не} = 4$ МПа путем изменения поверхности пароперегревателя $H_{не}$. Для поддержания необходимой $t_{не} = 440$ °С уменьшение поверхности нагрева ниже 750 м² требует повышения коэффициента избытка воздуха α_T выше значения 1,4 в зависимости от вида сжигаемого топлива и нагрузки. Наименьшие значения температур уходящих газов составляют 108÷125 °С (природный газ) и 125÷155 °С (каменный уголь) и достигаются при поверхностях нагрева $H_{не} = 700 \dots 800$ м².

Расчеты показали, что при отпуске пара через РОУ перевод котла ТП-170 на давление 4 МПа обеспечивает снижение мощности питательных насосов на 540 кВт, что позволяет экономить более 7500 т условного топлива в год по сравнению с его работой при давлении 10 МПа.

Таким образом, энерго- и ресурсосбережение на ТЭС может обеспечиваться рядом технологических мероприятий, включая оптимизацию графика выработки электрической энергии, модернизацию оборудования и повышения КПД энергоблоков, перевод старых ТЭС на пониженные параметры и др.

Литература

1. Ларин Б.М., Бушуев Е.Н., Козюлина Е.В., Тихомирова Ю.Ю. Реализация мониторинга водно-химического режима барабанных котлов // Теплоэнергетика. 2005. № 10. с. 11-17.
2. Мошкарин А.В., Шельгин Б.Л., Ананьин В.И. Оценка технической возможности эксплуатации парового котла ТП-170 на пониженных параметрах перегретого пара // Электр. Станции, 2001, № 12. С. 8-12.
3. Ананьин В.И. Разработка способов повышения эффективности теплоэнергетического оборудования ТЭС Центра России / автореферат диссертации канд. техн. наук. Иваново. – 2002. (библ. ИГЭУ).

УДК 621.321

А.К. СЕДОВА, магистрант, Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н., профессор,
Н.В. БУШУЕВА, ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: admin@xste.ispu.ru

Исследование и выбор флокулянта для повышения эффективности работы пластинчатого осветлителя на ТЭС-ПВС-1 ПАО «Северсталь»

Аннотация. Выполнены лабораторные исследования эффективности коагуляции маломинерализованной воды с повышенным содержанием органических веществ и соединений железа при использовании различных флокулянтов. Лучшие результаты получены для флокулянта марки Seurvey FL-3 (H10).

Ключевые слова: водоподготовительная установка, коагуляция воды, пластинчатый осветлитель, выбор флокулянта.

A.K. SEDOVA, graduate student,
E.N. BUSHUEV, Doctor of Engineering, professor,
N.V. BUSHUEVA, senior teacher
Ivanovo State Power Engineering University 153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

Research and selection of flocculant for increasing Efficiency of the plate clarifier At CHP-PVS-1 PJSC «Severstal»

Abstract. A laboratory study of the efficiency of coagulation of low-mineralized water with an increased content of organic substances with the use of various flocculants was carried out. The best results were obtained for the flocculant Seurvey FL-3 (H10).

Key words: Water treatment plant, water coagulation, plate clarifier, choice of flocculant.

На водоподготовительной установке ТЭЦ-ПВС-1 ПАО «Северсталь» установлены два пластинчатых осветлителя максимальной производительностью 300 м³/ч каждый. Осветлитель предназначен для предварительной обработки воды методом коагуляции сульфатом алюминия. В качестве исходной воды используется вода из реки Шексна, которая относится к маломинерализованной воде, но характеризуется высокими окисляемостью и содержанием соединений железа. Опыт эксплуатации показал не достаточную эффективность предварительной очистки воды на ТЭЦ-ПВС-1 [1]. Получаемая на осветлителе коагулированная вода характеризуется низким качеством по содержанию органических веществ и соединений железа [2] (во время проведения исследования: в речной воде – $O_k=12,6$ мгО/дм³; $C_{Fe}=0,52$ мг/дм³; в коагулированной воде – $O_k=7,5$ мгО/дм³; $C_{Fe}=0,4$ мг/дм³).

Высокие концентрации соединений железа в осветленной воде приводят к загрязнению механических и H-катионитных фильтров, установленных после пластинчатого осветлителя, соответственно и получаемая обессоленная вода характеризуется низкими показателями качества.

Эффективность тонкослойного осаждения определяется не только процессами, происходящими в тонкослойных сепараторах, но и такими факторами, как качество подготовки хлопьев, поступающих на осаждение, равномерность сбора и распределения воды, надежность системы удаления осадка [1]. Опыт эксплуатации показывает, что фактическая эффективность тонкослойных сепараторов меньше рекламируемой. При высоких производительностях не удается предотвратить флотацию шлама на поверхности воды, что приводит к его попаданию в чистый отсек. Вынос шлама не позволяет получить коагулированную воду требуемого качества и обеспечивать номинальную производительность горизонтальных осветлителей с тонкослойными сепараторами.

С целью повышения эффективности коагуляционной очистки вод с увеличенным содержанием железоорганических соединений с горизонтальными осветлителями путем предотвращения гидравлического и флотационного выноса шлама предлагается дозирование флокулянта в пластинчатый осветлитель для ускорения процесса образования и оседания шлама в нем.

При образовании тонкого шлама во время коагуляции за счет применения подходящего флокулянта удастся укрупнить этот шлам и увеличить располагаемую производительность осветлителя. В ряде случаев это увеличение оказывается значительным. Например, для осветлителей ВТИ-350 при коагуляции маломутной, маломинерализованной воды можно увеличить располагаемую производительность от 140 до 250 м³/ч [1]. Стоимость обработанной воды при использовании флокулянта увеличивается незначительно.

Основной целью проведенного исследования являлось определение типа и дозы флокулянта, использование которого позволило бы

максимально уменьшить, концентрации примесей (прежде всего органических соединений и соединений железа), находящихся в исходной воде, то есть получить более качественную осветленную воду.

На первом этапе, проводились исследования по подбору наиболее эффективных коагулянтов.

Для проведения лабораторного исследования использовалась свежетоbranная коагулированная вода после подачи сульфата алюминия в пленочный осветлитель. Доза флокулянта составляла 0,2 и 0,4 мг/дм³.

Методика проведения лабораторного исследования состояла в следующем. В мерные цилиндры наливали анализируемую воду объемом 1000 мл, добавляли при перемешивании 0,1% раствор тестируемых флокулянтов. Увеличивали скорость перемешивания на 1 минуту, после чего прекращали перемешивание и давали отстояться в течение 20 мин. Затем визуально определяли размер хлопьев шлама и скорость их оседания. Результаты визуального контроля для исследуемых флокулянтов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты визуального определения размера шламовых частиц и скорости их оседания

Марка флокулянта	Размер шламовых частиц	Скорость оседания шламовых частиц	Флотация
Катионактивный флокулянт			
PRAESTOL 853 BC	Мелкий песок	Медленно оседают	Происходит
Seurvey FL-9	Мелкий песок	Медленно оседают	Происходит
NALCO 71605	Мелкий песок	Медленно оседают	Происходит
NALCO 71613	Мелкий песок	Медленно оседают	Происходит
NALCO 71612	Мелкий песок	Медленно оседают	Происходит
Анионактивный флокулянт			
PRAESTOL 2540	Мелкий песок	Медленно оседают	Происходит
Seurvey FL-3	Небольшие слипшиеся комки	Медленно оседают, но быстрее остальных	Отсутствует
NALCO 71603	Мелкий песок	Медленно оседают	Происходит
NALCO 71604	Мелкий песок	Медленно оседают	Происходит
HYDREX 63601	Мелкий песок	Медленно оседают	Происходит
NALCO 71601	Мелкий песок	Медленно оседают	Происходит немного
AN 910 SH	Небольшие слипшиеся комки	Медленно оседают, но быстрее остальных	Отсутствует

Проведенные лабораторные испытания показали, что наиболее эффективными для условий работы осветлителей на ТЭЦ-ПВС-1 ПАО «Северсталь» являются анионактивные флокулянты, прежде всего AN 910 SH и Seurvey FL-3.

На втором этапе исследования, оценивалось эффективность применения выбранных флокулянтов по снижению содержания органических веществ и соединений железа. Результаты контрольного опыта представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты контрольного опыта

Показатель	Исходная вода	Коагулированная вода после дозирования флокулянта марки	
		AN 910 SH	SeurveyFL-3
O_K , гО/дм ³	15,6	5,28	4,96
C_{Fe} , мг/дм ³	0,68	0,46	0,38

Полученные данные, показали, что наиболее эффективной является дозировка анионоактивного флокулянта типа Seurvey FL-3(H10), который значительно повышает скорость и качество осветления коагулированной воды, уменьшая содержание в воде соединений железа в 2 раза и примерно в 3 раза снижая окисляемость по сравнению с режимом без ввода флокулянта. Для проведения эффективной обработки воды достаточна доза флокулянта, равная 0,2 мг/дм³.

Литература

1. **Обобщение** опытов предварительной очистки воды на ТЭС / Жадан А.В., Смирнов Б.А., Смирнов О.В., Виноградов В.Н., Аван В.К., Карпычев Е.А. // Вестник ИГЭУ. 2011. № 1. С. 10–16.
2. **Совершенствование** водоподготовки на ТЭС / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, А.Б. Ларин, Е.А. Карпычев, А.В. Жадан // Теплоэнергетика. 2015. № 4. – С. 58–64.

УДК 621.321

Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н., профессор,
Н.В. БАЛАШОВА, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: admin@xjte.ispu.ru

Исследование влияния факторов на технологические характеристики установки обратного осмоса с использованием расчетных программ

Аннотация. Выполнен критический анализ возможностей компьютерных программ по расчету мембранных установок обработки воды на ТЭС. Проведено исследование влияния различных технологических факторов на эффективность работы установки обратного осмоса методом вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: водоподготовительная установка, установка обратного осмоса.

E.N. BUSHUEV, Doctor of Engineering, professor,
H.B. БАЛАШОВА, graduate student

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: *admin@xste.ispu.ru*

Investigation of the influence of factors on the technological characteristics of the reverse osmosis unit Using settlement programs

Abstract. A critical analysis of the capabilities of computer programs for the calculation of membrane water treatment plants at TPPs has been performed. A study was made of the influence of various technological factors on the efficiency of the reverse osmosis plant using the computational experiment.

Key words: Water treatment plant, installation of reverse osmosis.

В настоящее время одним из наиболее перспективных и эффективных способов деминерализации воды является ее обработка на установке обратного осмоса (УОО) [1, 2]. Технологический расчет мембранных установок в настоящее время осуществляется в основном с помощью компьютерных программ, которые предоставляются компаниями производителями мембранных элементов. К таким программам относятся: ROSA (Reverse Osmosis System Analysis), IMSDesign, NanoTechPRO, Toray DC, WATERLAB и др.

Наиболее широко для определения рабочих характеристик мембранных установок используется компьютерная программа ROSA (разработчик фирма Dow Chemical), которая предназначена для проведения технологического расчета установок обратного осмоса и нанофильтрации с элементами фирмы FILMTEC. К недостатку этой программы можно отнести отсутствие учета некоторых вариантов обработки воды, поступающей на установку, таких как добавление коагулянта, антискалянтов и т.д. Кроме того, не предусмотрена программная оптимизация выбора необходимого количества обратноосмотических элементов и модулей.

Программа IMSDesign (разработчик фирма Hydranauticsa Nitto Denko Corporation), предназначена для расчета установок обратного осмоса, ультрафильтрации и нанофильтрации с применением мембранных элементов фирмы Hydranautics. В нее заложена оптимизация нахождения необходимого количества обратноосмотических модулей. В программе имеется возможность задавать установку в обратноосмотическом модуле до трех различных типов мембранных элементов. Имеется возможность подбора необходимого насосного оборудования.

Программа NanoTechPRO предназначена для расчета параметров УОО с применением мембранных элементов российской компании МЕМБРАНИУМ. В нее заложены данные по многим источникам исходной воды (морская вода, тестовые и колодезные воды, пресные водо-

источники) и представлена база данных мембранных элементов с возможностью использования мембран других фирм производителей. В программе указываются критические ошибки, которые не позволяют сделать расчет мембранной установки.

В работе проводилось исследование по сравнению эффективности обратноосмотических элементов с одинаковыми техническими характеристиками разных производителей, с помощью компьютерных программ фирм производителей этих мембранных элементов.

В качестве исходной воды для расчета была принята умягченная вода реки Москва. Коэффициент выхода пермеата (гидравлический КПД) задавался равным 75 %. Производительность установки – 75 м³/ч. Для расчета была принята одноступенчатая двухкаскадная установка.

Сравнение эффективности очистки проводилось для трех мембранных элементов разных производителей: CPA5 MAX-8040 (фирма Hydranautics), BW30HR-440i (фирмы Filmtec) и KC 8040-C (фирмы Мембраниум). Мембранные элементы разных производителей подбирались так, чтобы их технические характеристики были близки.

Результаты сравнения расчетных характеристик эффективности обессоливания воды рассмотренных мембранных элементов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчета показателей качества пермеата для обратноосмотических элементов различных производителей

Показатель	Исходная вода	Пермеат после обратноосмотического элемента		
		KC 8040-C	BW30HR-440i	CPA5 MAX-8040
C _{Na+} , мг/л	98,14	0,74	1,80	1,34
C _{Mg²⁺} , мг/л	0,20	0,00	0,00	0,00
C _{Ca²⁺} , мг/л	0,50	0,00	0,00	0,00
C _{Cl⁻} , мг/л	25,50	0,29	0,32	0,19
C _{SO₄²⁻} , мг/л	13,50	0,05	0,09	0,03
C _{HCO₃⁻} , мг/л	201,00	1,91	4,21	3,21
C _{CO₂} , мг/л	9,14	9,12	7,43	9,6
C _{SiO₂} , мг/л	10,00	0,07	0,04	0,07
TDS, мг/л	349,32	3,06	6,46	4,90
pH	7,50	5,54	5,97	5,74

Рассмотренные обратноосмотические элементы имеют близкие характеристики водных потоков УОО: концентрата и пермеата. При этом мембранные элементы фирмы Мембраниум обеспечивают получение пермеата с содержанием в 2 раза меньше по сравнению с мембранами фирмы Filmtec и в 1,5 раза меньше по сравнению с мембранами фирмы Hydranautics, что существенно влияет на эффективность работы последующих после УОО ступеней обессоливания.

В работе исследовалось влияние различных факторов (температуры и минерализации обрабатываемой воды, тип обратноосмотического

элемента, схемные решения по компоновке обратноосмотических модулей и т.д.) на эффективность работы УОО методом вычислительного эксперимента.

В программа IMSDesign в качестве варьируемого параметра задается срок эксплуатации мембранного элемента, который обычно составляет от 4 до 8 лет, после которого требуется полная их замена. В работе исследовалось, как производители прогнозируют ухудшение эксплуатационных характеристик обратноосмотических элементов в зависимости от срока их использования при очистке воды.

Результаты выполненного расчета представлены на рис. 1.

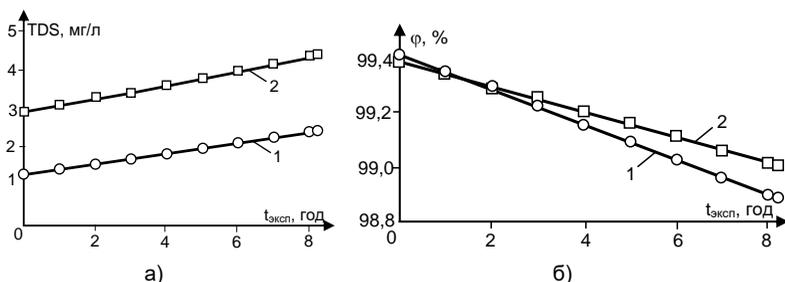


Рис. 1. Зависимость солесодержания пермеата (а) и селективности мембран (б) от срока эксплуатации обратноосмотического элемента:

1, 2 – обратноосмотический модель первого и второго каскада, соответственно

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением срока службы обратноосмотических элементов солесодержание пермеата увеличивается, а селективность мембран уменьшается (в среднем, по данным фирм производителей, на 0,04–0,06 % в год), причем эти изменения носят практически линейный характер, и они зависят от условий работы мембраны.

Литература

1. **Анализ** современных технологий водоподготовки на ТЭС / Е.Н. Бушуев, Н.А. Еремина, А.В. Жадан // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. Вып. 1. –С. 8–14.
2. **Расчетный** анализ схем обессоливания воды на ТЭС на базе мембранных методов / Бушуев Е.Н. // В сборнике: Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии XVIII Бенардосовские чтения: материалы междунар. науч.-техн. конф. 2015. –С. 82–85.

УДК 621.187

А.Ю. БУДАЕВА¹, аспирант,
Е.Н. БУШУЕВ², д.т.н., профессор
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153000 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: abdvalenka@mail.ru¹, admin@xxte.ispu.ru²

Определение физико-химических свойств водных растворов хеламина

Аннотация: несмотря на длительный опыт применения плёнкообразующих аминов в энергетике, их химические свойства в эксплуатационных условиях описаны в технической литературе недостаточно. Необходимы дополнительное их изучение и оценка технической эффективности с целью уточнения рекомендаций по использованию.

Ключевые слова: водно-химический режим, барабанный котел, пароводяной тракт, хеламин, водно-химическая очистка.

A. Yu. BUDAEVA, postgraduate student,
E.N. BUSHUEV, Doctor of Engineering sciences, professor
Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: abdvalenka@mail.ru¹, admin@xxte.ispu.ru²

Determination of physico-chemical properties of aqueous solutions of Helamin

Abstract: despite long experience of use of film-forming amines in power engineering, chemical properties in operational conditions are not enough described in technical literature. Their additional studying and an assessment of technical efficiency for the purpose of specification of recommendations about use are necessary.

Key words: water chemistry, waste heat boiler, steam-water, Helamin, water and chemical cleaning.

В настоящее время в России распространён хеламинный водно-химический режим (ХВХР). На ряде электростанций в качестве единого заменителя аммиака, гидразин-гидрата и фосфатов используется хеламин. ХВХР способствует предотвращению повреждений труб поверхностей нагрева барабанных котлов (БК), которые могут произойти вследствие их внутренней коррозии. Условия и вероятность повреждения экранных труб БК описаны в [1]. В частности, коррозионные повреждения труб возможны при:

- появлении присосов охлаждающей воды в отсутствии очистки турбинного конденсата и фосфатирования котловой воды;
- низкой буферности слабощелочных котловых вод и загрязнении питательной воды потенциально кислыми соединениями;

- коррозии – эрозии стали в интервале температур от 160 до 180 °С (гибы труб котлов-утилизаторов контуров низкого давления и экономайзеров) при $p_{H_{25}}$ теплоносителя менее 9,0.

Товарный хеламин представляет собой смесь поликарбоксилатов, насыщенных алкилполиаминов, полиаминов, летучих полиаминов с подщелачивающим эффектом. Структура основного активного компонента поверхностно-активного амина (ПОА) типа Helamin описывается формулой:



где «n» может изменяться от 1 до 7; R – алифатическая цепь с C_{12} и C_{20} доминирующим [2].

Несмотря на длительный опыт применения ПОА в энергетике, их химические и эксплуатационные свойства описаны в технической литературе недостаточно. Необходимы дополнительное их изучение и оценка технической эффективности с целью уточнения рекомендаций по использованию.

Экспериментальным путем в лабораторных опытах получена первичная информация о данном реагенте. В сопровождающей документации на этот продукт отсутствуют сведения [3]: о массовой доле аналитически определяемого вещества, названного производителями хеламином; о плотности, показателе $p_{H_{25}}$, удельной электропроводности водных растворов реагента при его различных массовых долях; о константах диссоциации (гидролиза) его компонентов и т. д.

Одна из главных задач исследования – определение технологически важных свойств водных растворов хеламина марки BRW 150H в зависимости от степени его разбавления обессоленной водой. Разбавление раствора проведено в 10–100000 раз.

Для каждого раствора с определенной степенью разбавления измерены: удельная электропроводность; водородный показатель $p_{H_{25}}$; плотность раствора; концентрация аналитически определяемого вещества – хеламина.

В табл.1 представлены результаты экспериментальных исследований.

Таблица 1. Свойства водных растворов товарного хеламина марки BRW150H

Параметр	Степень разбавления товарного продукта					
	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
Удельная электропроводность раствора, мкСм/см	>5000	3365	783,3	163,9	32,3	7,02
$p_{H_{25}}$	11,83	11,7	11,15	10,4	9,5	7,07
Плотность водного раствора, кг/м ³	1,016	0,997	0,996	0,995	0,994	0,993
Концентрация хеламина в растворе, г/дм ³	209	20,9	2,09	0,210	0,220	0,010

По итогам лабораторных исследований проведены расчёты массовой доли аналитически определяемого вещества в неразбавленном растворе и условной константы гидролиза для водных растворов в диапазоне концентраций от 209 г/дм³ до 10 мг/дм³.

Полученные результаты расчёта условной константы гидролиза приведены в табл. 2.

Таблица 2. Условные константы гидролиза хеламина в водных растворах

$pC_{\text{хел}}$	5,32	4,32	3,32	2,32	1,34	1
pK^*	9,66	8,92	9,02	9,52	10,34	14,86

Наблюдаемая зависимость условной константы гидролиза хеламина при его больших концентрациях указывает на преобладающее участие в гидролизе различных компонентов. В разбавленных растворах показатель условной константы pK^* находится в диапазоне от 9,0 до 9,7. Причину минимума pK^* в диапазоне $pC_{\text{хел}}$ от 3,32 до 4,32 определить с использованием полученных данных оказалось невозможно. Теоретически степень гидролиза увеличивается при уменьшении концентрации гидролизующего вещества. В данном случае наблюдается противоположный эффект.

На основе выполненных исследований можно сделать следующие выводы [4]:

1. Массовая доля аналитически определяемого вещества в хеламине в техническом продукте BRW 150H составляет 20 %.
2. С увеличением степени разбавления хеламина показатель pH_{25} его растворов уменьшается.
3. Условная (кажущаяся) константа гидролиза в широком диапазоне малых концентраций практически неизменна и находится в диапазоне от 9,0 до 9,7.
4. По данным сертификата на технический продукт, его «основной компонент, определяющий щелочные свойства композиции, это циклогексиламин (ЦГА)». Константа диссоциации ЦГА при температуре 20 °C имеет порядок 10^{-6} . Экспериментальные значения условной константы гидролиза хеламина существенно меньше. В рабочем диапазоне концентраций они имеют порядок 10^{-8} , что меньше, чем для аммиака.

Литература

1. **Богачев А.Ф.** Изучение и предотвращение коррозии металла в зонах фазовых превращений и перегретом паре// [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.combienergy.ru/stat/1151-K-voprosu-vliyaniya-organicheskikh-aminosoderjashchih>
2. **Богачев А.Ф.** Хеламинный водно-химический режим котлов-утилизаторов парогазовых установок // Электрические станции. – 2006. – № 7. – С. 33–36.

3. **Экспертное заключение** «Ингибиторы коррозии и отложений марок: «Helamin BRW 150 Н...».

4. **Предпусковая** водно-химическая очистка котла-утилизатора ПГУ-410 с использованием хеламина BRW 150Н / А.Ю. Будаева, Е.Н. Бушуев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 6. –С. 20–26.

УДК 621.187

А.Ю. БУДАЕВА¹, аспирант, Е.Н. БУШУЕВ², д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153000 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

E-mail: abdvalenka@mail.ru¹, admin@xxte.ispu.ru²

Исследование процесса удаления отложений с внутренних поверхностей нагрева паровых котлов

Аннотация: Проведены лабораторные исследования химической очистки от отложений экранных труб парового котла высокого давления. Получены зависимости скоростей химической очистки и коррозии металла в различных условиях.

Ключевые слова: паровой котёл, химическая очистка, коррозия металла, бугорчатые отложения.

A. Yu. BUDAEVA, postgraduate student,
E.N. BUSHUEV, Doctor of Engineering sciences, professor
Ivanovo State Power University

153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

E-mail: abdvalenka@mail.ru¹, admin@xxte.ispu.ru²

Research of removal process of deposits from internal heating surfaces of steam boilers

Abstract: The laboratory researches of chemical cleaning of deposits of furnace tubes steam boilers are done. The rates' dependences of cleaning and metal corrosion in various conditions are obtained.

Key words: steam boiler, chemical cleaning, metal corrosion, lumpy deposits.

Надёжность и экономичность работы паровых котлов существенно зависят от наличия отложений (накипи) на поверхностях нагрева. На внутренней поверхности котлов во время их работы, а также во время простоя могут образовываться отложения, различные по химическому составу и структуре. В зависимости от теплопроводности накипь толщиной от 2 до 3 мм может вызвать увеличение температуры стенок экранных кипяточных труб до 800–900 °С, что может привести к повреждению труб [1]. Для предотвращения повреждений труб, обусловленных внутритрунными отложениями, требуется эксплуатационная химическая очистка (ЭХО) их внутренних поверхностей и, в первую

очередь, труб солевого отсека, где зачастую обнаруживают бугорчатые уплотнившиеся отложения шлама на огневой стороне труб.

Основными моющими реагентами при ЭХО могут быть: минеральные и органические кислоты, комплексоны, щёлочи, или композиции названных веществ. Несмотря на длительный опыт их применения, механизм моющего действия изучен не в достаточной мере.

Для лабораторного исследования взяты образцы труб солевого отсека котла высокого давления. Основными компонентами их внутритрубных отложений являются соединения железа и меди. Эти отложения: на огневой стороне труб являются бугорчатыми; на тыльной (необогреваемой) стороне труб – равномерными, рыхлыми без бугорков или с плотными бугорками небольшой высоты.

Лабораторная ХО от отложений проводилась с применением ингибированной соляной кислоты с добавлением комплексообразователя меди – тиомочевины. Очистка выполнена в нагретых неподвижных и подвижных растворах. Для установления зависимостей скорости очистки образца и скорости коррозии чистой стали от времени ХО проведена несколько этапов.

Экспериментальные данные, полученные при исследовании процессов удаления отложений с внутренних поверхностей нагрева образцов труб, представлены на рис. 1 и 2.

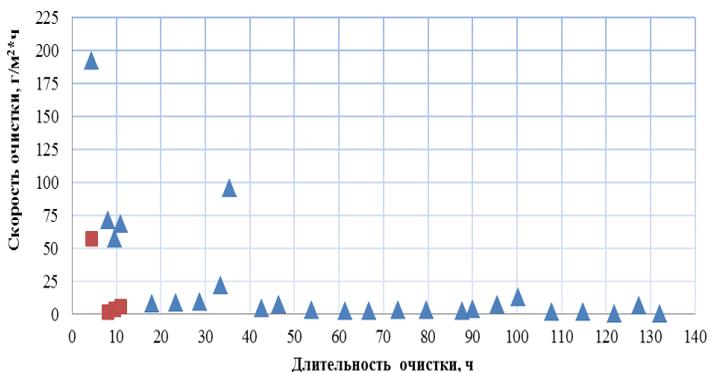


Рис. 1. Зависимость скорости очистки от её длительности (без нагрева):

- ▲ – результаты ХО от «бугорчатых» отложений в неподвижном растворе (ингибированная соляная кислота с добавлением тиомочевины);
- – ХО от равномерных отложений в неподвижном растворе

На основании данных рис. 1 и 2 можно сделать вывод о том, что скорость ХО от отложений с течением времени уменьшается (выбросы точек вверх на графиках соответствуют добавке свежего раствора кислоты, которая увеличила кислотность моющего раствора и, следовательно, скорость очистки от отложений).

Установлено, что скорость коррозии в процессе очистки была больше допустимой скорости коррозии стали 3 в холодном растворе технической ингибированной соляной кислоты, равной $0,2 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Кислотность раствора в процессе очистки так же уменьшалась.

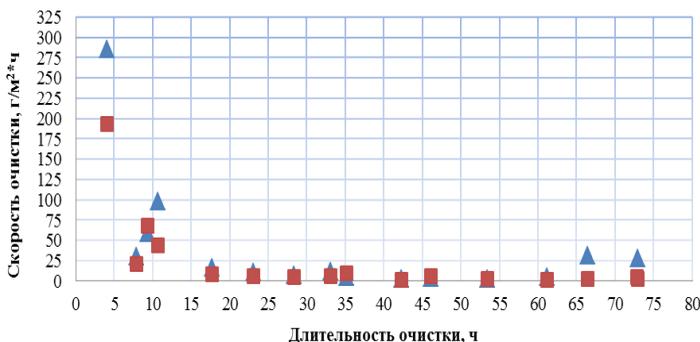


Рис. 2. Зависимость скорости очистки от её длительности (при нагревании):

- ▲ — результаты ХО от «бугорчатых» отложений в неподвижном растворе;
- — результаты ХО от равномерных отложений в неподвижном растворе

Исследование процесса удаления отложений проводилось гравиметрически. Степень их удаления рассчитана как отношение массы удалённых отложений к их первоначально взятой общей массе на образце. На рис. 3 в координатах «степень удаления отложений (α) — длительность очистки (τ)» представлен процесс удаления равномерных отложений при лабораторной ХО в нагретом неподвижном растворе ингибированной соляной кислоты с добавлением тиомочевины.

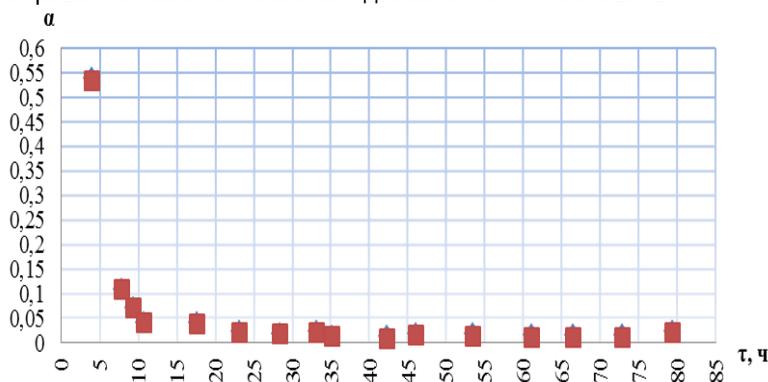


Рис. 3. Зависимость степени удаления равномерных отложений с учётом коррозии металла от длительности химической очистки

Таким образом, по результатам лабораторной ХО от отложений образцов экранных труб, можно предположить, что скорость очистки увеличена при их большей удельной загрязнённости, и утверждать, что:

- наибольший эффект ХО достигается на её начальном этапе;
- нагрев и циркуляция моющего раствора увеличивают скорость ХО и уменьшают длительность её проведения.

Скорость коррозии чистого металла, определённая с использованием пластинчатых образцов, увеличивается по мере возрастания температуры моющего раствора. Полученные результаты свидетельствуют о возможности и результативности исследования кинетики удаления отложений, которая позволит глубже понять механизм процессов удаления отложений и управлять ими. Изучению подлежат общий эффект очистки от отложений и эффект очистки от соединений меди.

Литература

1. **Методические** указания по надзору за водно-химическим режимом паровых и водогрейных котлов (РД 10-165-97): постановление Федерального горного и промышленного надзора России от 8 декабря 1997 г. N 49 [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294849/4294849929.htm>.

СЕКЦИЯ 9. «ТЕПЛООБМЕН В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ»

УДК 536.33:536.244

Г.В. КУЗНЕЦОВ¹, д.ф.-м.н., зав. каф.,
Н.И. КУРИЛЕНКО², к.т.н., доцент,
В.И. МАКСИМОВ³, к.т.н., доцент,
Т.А. НАГОРНОВА⁴, к.т.н., доцент

^{1,3,4} Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

² Тюменский государственный архитектурно-строительный университет,
634050, Россия, Томск, пр. Ленина, 30

E-mail: Kuznetsov@tpu.ru¹, ktgv@tgasu.ru², elf@tpu.ru³, Tania@tpu.ru⁴

Конвективно-кондуктивный теплоперенос в помещении с системами лучистого нагрева

Аннотация: представлены результаты численных и экспериментальных исследований температурных полей в отапливаемом системами лучистого нагрева помещении. Рассчитанные основные интегральные характеристики процессов теплопереноса могут быть полезны при решении задач энергосбережения.

Ключевые слова: Тепловой режим помещения, система лучистого отопления, конвективный теплообмен, верификация модели, температурные поля.

G.V. KUZNETSOV¹, doctor of Physico-mathematical Sciences, professor,
N.I. KURYLENKO², candidate of engineering sciences, associate professor,
V.I. MAKSIMOV³, candidate of engineering sciences, associate professor,
T.A. NAGORNOVA⁴, candidate of engineering sciences, associate professor

^{1,3,4} National research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia

² Tyumen State Architecture- and Construction University, Tyumen, 625001, Russia,

E-mail: Kuznetsov@tpu.ru¹, ktgv@tgasu.ru², elf@tpu.ru³, Tania@tpu.ru⁴

Convective-conductive heat transfer in the accommodation with radiant heating systems

Abstract: the results of numerical and experimental studies of temperature fields in accommodation heated by radiant heating systems are presented. The calculated basic integral characteristics of heat transfer processes can be useful in solving energy saving problems.

Keywords: thermal regime of the accommodation, radiant heating system, convective heat exchange, model verification, temperature fields.

Проблемами экологии окружающей среды и снижению антропогенных выбросов в последние годы уделяется большое внимание. Но экологическая эффективность энергетики может быть достигнута толь-

ко при значимом снижении объемом сжигаемых топлив. При решении же задач энергосбережения в теплоснабжении невозможно обойтись без анализа тепловых режимов промышленных объектов. Поэтому целью работы является экспериментальное исследование и математическое моделирование температурных полей в замкнутой крупногабаритной воздушной полости в рамках модели сопряженного теплопереноса при турбулентном течении воздуха.

Экспериментальные исследования проведены на крупногабаритной модели реального объекта (рис. 1) при регламентном режиме его эксплуатации. Эксперименты проводились в зимний период времени при температуре наружного воздуха минус 20 °С и начальной температуре внутри помещения 18 °С. Максимальная мощность газового инфракрасного излучателя в системе лучистого нагрева составляла 20 кВт.

При численном решении задачи теплопереноса в помещении (рис.1) с работающим излучателем, приняты в качестве исходных данных условия проведения эксперимента (начальные и граничные условия). Исследование посвящено определению основных интегральных характеристик (средней температуры воздуха, температуры поверхности напольного перекрытия и коэффициентов теплоотдачи с поверхности ограждающих конструкций). Полученное в эксперименте распределение плотности теплового потока по поверхности бетонного основания в сечении $Y = H_1$ от $X = L/2$ (рис. 1), применялось в качестве условия на границе раздела сред: «воздух – нижняя ограждающая конструкция» при математическом моделировании.

Для описания процесса сопряженного теплопереноса в области решения задачи (рис. 1) в качестве базовой использовалась математическая модель [1]. Система дифференциальных уравнений включала уравнения Навье-Стокса для газа, записанные в преобразованных переменных (функция тока – вихрь скорости), и уравнения энергии для каждого из элементов области с соответствующими начальными и граничными условиями. Для учета турбулентности применялась стандартная $k-\varepsilon$ модель [2].

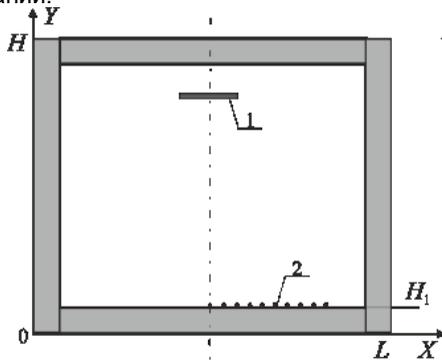


Рис. 1. Область решения задачи:
L, H – длина и высота области соответственно, 1 – излучатель, 2 – термодатчики

Задача решена в безразмерном виде, но для сравнения численных и экспериментальных значений температур все полученные параметры были приведены к размерным. Численные исследования проведены на

разностных сетках с числом точек (51×51, 101×101, 201×201, 301×301, 401×401). Учитывая достаточно крупные габариты исследуемой области, проведен анализ влияния параметров разностной сетки на результаты вычислений. Сравнение температур поверхности нижнего бетонного основания, установленных экспериментально и численно, позволило выбрать оптимальные параметры сетки, при которых достигалось наилучшее совпадение результатов экспериментов и численного моделирования.

Анализ результатов (рис. 2) показывает, что применение крупной сетки с малым числом точек (101×101) неприемлемо для расчета процессов в крупногабаритных областях даже в безразмерной постановке. Зависимости $\Theta(\tau)$ и $Nu_{avg}(\tau)$ становятся более гладкими с увеличением числа узлов сетки. Также стоит заметить, что для экономии времени можно ограничиться сеткой 301×301.

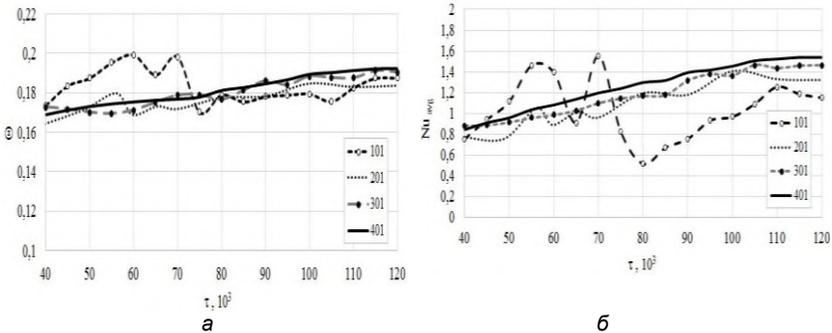


Рис. 2. Изменения с ростом времени средней температуры воздуха Θ (а) в рассматриваемом помещении и безразмерного среднего коэффициента теплообмена на левой границе раздела сред (б), полученных для различного числа узлов разностной сетки

На рис. 3 представлены результаты численного моделирования поставленной задачи для момента времени, соответствующего эксперименту (1 час физического времени). Значения температур поверхности нижнего бетонного перекрытия (рис. 3) зафиксированы в сечении $Y = H_1$ от оси симметрии ГИИ по направлению к правой боковой ограждающей конструкции (в размерных переменных от 4 до 7 м). Хорошо видно, что результаты математического моделирования попадают в доверительный интервал экспериментальных данных.

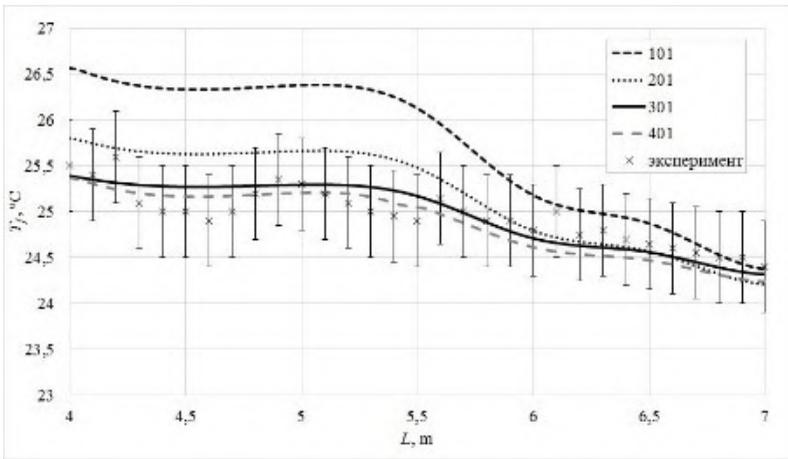


Рис. 3. Распределение температур поверхности пола по направлению от центра излучателя к боковым ограждениям

На основании анализа рис. 3 можно сделать вывод, что результаты экспериментальных и численных исследований (значения температур нижнего бетонного основания) хорошо соответствуют. Разработанная математическая модель конвективно-кондуктивного теплопереноса в рассматриваемой замкнутой системе может быть применима для вычисления температур воздуха и последующего выбора параметров микроклимата производственных помещений с системами отопления на базе газовых инфракрасных излучателей.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ (проект НШ – 7538.2016.8).

Литература

1. **Maksimov V.I.**, Nagornova T.A., Kurilenko N.I. Document Verification of Conjugate Heat Transfer Models in a Closed Volume with Radiative Heat Source // MATEC Web of Conferences. 2016. V. 72. Article number 01061.
2. **Analysis** of Turbulent Flows with Computer Programs / Tuncer Cebeci. – 3th ed. – Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK. 2013.

УДК 621.521

О.А. ЕВДОКИМОВ, к.т.н., доцент,
С.В. ВЕРЕТЕННИКОВ, к.т.н., доцент,
Ш.А. ПИРАЛИШВИЛИ, д.т.н., профессор

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева
152934, Ярославская обл., г. Рыбинск, ул. Пушкина 53
E-mail: yevdokimov_oleg@mail.ru

Вакуумирование и очистка форсуночного коллектора в составе ГТД

Аннотация: разработана технология и проведены экспериментальные исследования очистки форсунок авиационного газотурбинного двигателя без его снятия с крыла самолета, заключающаяся в организации циркуляционной схемы течения моющей жидкости за счет вакуумирования второй ступени топливного коллектора вихревым эжектором.

Ключевые слова: форсунка, очистка, вихревой эжектор, вакуум.

O.A. EVDOKIMOV, PhD, assistant professor,
S.V. VERETENNIKOV, PhD, assistant professor,
Sh.A. PIRALISHVILI, Doctor of Engineering, professor

P.A. Soloviev Rybinsk State Aviation Technical University
152934, Yaroslavl reg., Pushkina st., 53
E-mail: yevdokimov_oleg@mail.ru

Vacuuming and cleaning nozzle collector of GTE

Abstract. There were developed a technology and carried out experimental research of aviation GTE's nozzles cleaning without their dismantling from the plane's wing. The technology consist in organization of circulation flow of washing liquid by means of vacuuming second stage of fuel collector using vortex ejector.

Key words: nozzle, cleaning, vortex ejector, vacuum.

В процессе эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей возникает ряд проблем, связанных с ухудшением качества распыла топлива форсунками вследствие их закоксования. В настоящее время очистка топливных форсунок от нагара выполняется механическим путем, заключающемся в их демонтаже при снятии двигателя с самолета, что является достаточно затратным и неэффективным.

Гидравлические исследования по очистке топливных двухконтурных форсунок двигателей Д-30КУ/КП/КУ-154, проведенные ранее ПАО «НПО «Сатурн», показали, что перспективной является организация подачи промывочной жидкости через коллектор первого контура и ее откачка через коллектор второго контура. Это с одной стороны позволяет осуществить промывку форсунок непосредственно «на крыле», не

прибегая к необходимости их демонтажа. С другой стороны, требует проработки и реализации гидравлической циркуляционной схемы, обеспечивающей требуемые перепады давления в контурах форсуночного коллектора.

Решение приведенной задачи возможно в случае обеспечения необходимого перепада давления за счет создания области разрежения на входе во второй контур коллектора форсунок. Откачка загрязненной жидкости по отмеченной схеме, как правило, дополнительно сопровождается засасыванием воздушных масс и требует реализации процессов сепарации и фильтрации с целью организации ее повторного использования.

Исследования многих авторов показывают, что добиться высоких значений степени разрежения, в том числе и при движении многофазных потоков, возможно за счет использования эжекторных устройств [1-3]. Отмеченный класс устройств эффективно зарекомендовал себя в тех отраслях промышленности, энергетики и строительства, где требуется обеспечение условий «глубокого» вакуума, а также организация процессов сепарации и смешения.

Экспериментальные исследования по вакуумированию второго контура топливного коллектора позволили обеспечить значение доли возвращаемой в систему жидкости до 99% (рис. 1). Проведенные испытания по промывке топливных форсунок, как в индивидуальной постановке, так и в составе коллектора, продемонстрировали высокое качество очистки наружных поверхностей распылителей от лакового и сажистого нагара (рис. 2).

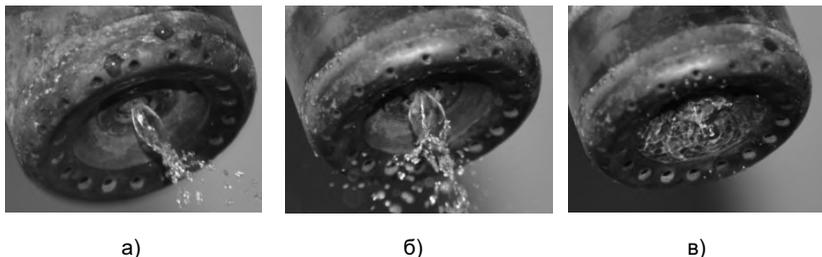


Рис. 1. Визуализация вакуумирования сопла форсунки при $p_{ж} = 0,55 \cdot 10^5$ Па:
а) $p_{вак} = 0,95 \cdot 10^5$ Па; б) $p_{вак} = 0,9 \cdot 10^5$ Па; в) $p_{вак} = 0,8 \cdot 10^5$ Па;

Выполненные экспериментальные исследования показали, что вакуумирование коллектора до давления $0,8 \cdot 10^5$ Па при давлении подачи воды позволяет $p_{ж} = 0,55 \cdot 10^5$ Па позволяет организовать откачку свыше 96% жидкости от общей массы, подводимой в коллектор.



Рис. 6. Фотографии топливной форсунки: а) до очистки; б) после очистки

Показанные на рисунке 3 показаны результаты экспериментальных исследований по вакуумированию жидкости при различных значениях ее давления на входе в коллектор. Видно, что при давлении вакуумирования $p_{\text{вак}} = 0,6 \cdot 10^5$ Па для всех рассматриваемых режимов подачи доля жидкости, возвращенной в систему превышает значение 0,84.

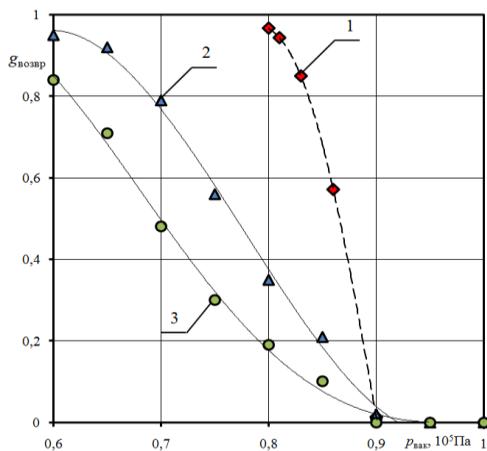


Рис. 4. Зависимость массовой доли жидкости, возвращаемой в систему, от абсолютного давления вакуумирования:
 1 – $p_{\text{ж}} = 0,55 \cdot 10^5$ Па; 2 – $p_{\text{ж}} = 1,0 \cdot 10^5$ Па; 3 – $p_{\text{ж}} = 1,9 \cdot 10^5$ Па.

Проведенные испытания по вакуумированию и промывке топливных форсунок в составе коллектора определили возможность обеспечения значения доли возвращаемой в систему жидкости до 99% и продемон-

стрировали высокое качество очистки наружных поверхностей распылителей от лакового и сажистого нагара.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №16-08-00974 «Развитие модельного описания тепломассообменных процессов в закрученных ограниченных течениях и его применение при создании устройств перспективных технологий».

Литература

1. **Вихревой** эффект. Технические приложения. Т.2. Ч.2. / В.В. Бирюк, С.В. Веретенников, А.И. Гурьянов, Ш.А. Пиралишвили. – М.: Научтехлитиздат, 2014. 288 с.
2. **Вихревые** аппараты / А.Д. Сулов, С.В. Иванов, А.В. Мурашкин, Ю.В. Чижиков. – М.: Машиностроение, 1985. –256 с.
3. **Пиралишвили Ш.А.** Расчетно-экспериментальное исследование смесеобразования в вихревом смесителе // Авиационная техника. – 2012. №2. С. 47-50.

УДК 536.24

С.В. ВЕРЕТЕННИКОВ, к.т.н., доцент,
Ш.А. ПИРАЛИШВИЛИ, д.т.н., профессор,

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53
E-mail: serveret@yandex.ru

Газодинамика и теплообмен при взаимодействии комбинированной закрученной струи с преградой

Аннотация: представлены исследования интенсификации теплообменных процессов за счет создания комбинированной закрученной струи, показавшие возможность значительно (в 1,5 и более раз) увеличить коэффициенты теплоотдачи и расширить область воздействия струи на поверхность.

Ключевые слова: интенсификация, теплоотдача, закрученная струя, охлаждение.

S.V. VERETENNIKOV ,
Sh.A. PIRALISHVILI Doctor of Engineering, professor,

Rybinsk State Aviation Technical University named after P. A. Solovyov
152934, Rybinsk, Pushkin st., 53
E-mail: serveret@yandex.ru

Gas dynamics and heat transfer in the interaction of a combined swirling jet with a wall

Abstract. The results of the study of the intensification of heat exchange processes due to the creation of a combined swirling jet are shown, which showed the possibility to increase (by 1.5 or more) the heat transfer coefficients and expand the area of the jet impact on the surface.

Key words: intensification, heat transfer, swirling jet, cooling.

Импактные струи являются одними из наиболее эффективных интенсификаторов теплообмена в большом числе энергоустановок. Интерес к этим задачам возник давно и к настоящему времени по этой проблеме накоплена обширная информация [1, 2]. Однако интерес к импактным струям не ослабевает, и в настоящее время ведутся интенсивные поиски возможностей управления тепломассообменом в подобных системах.

Взаимодействие импактных струй с преградами существенно усложняется, когда импактная струя имеет вращательную компоненту скорости. Теплообмен и структура течения при натекании вихревых импактных струй на поверхности до настоящего времени изучена мало. В имеющихся немногочисленных работах [3] показано, что процесс взаимодействия закрученных струй с преградами является сложным и многофакторным. Увеличение закрутки струи приводит к интенсификации процессов перемешивания, в результате чего при больших расстояниях между соплом и поверхностью теплообмен с закрученной струей значительно снижается по сравнению с прямой. На малых расстояниях картина может поменяться на обратную и в радиальном распределении коэффициента теплоотдачи появляются дополнительные максимумы обусловленной спецификой формирования вихревых струй с различной интенсивностью закрутки, величиной числа Рейнольдса и расстоянием между поверхностью и устьем струи.

При увеличении интенсивности закрутки потока у стенки вблизи точки торможения возникает стационарная рециркуляционная зона. Наличие этой зоны в центре пластины приводит к возрастанию толщины теплового пограничного слоя и уменьшению коэффициента теплоотдачи. Данный факт подтверждается как результатами численных расчетов, так и экспериментальными данными. Одним из основных недостатков импактного охлаждения поверхности закрученной струей является низкие коэффициенты теплоотдачи вблизи точки торможения потока. Для интенсификации теплоотдачи в этой области предлагается использовать комбинированную струю, состоящую из периферийного закрученного потока и центральной осевой струи.

Проведены численные и экспериментальные исследования интенсификации теплообмена при взаимодействии импактной струи с плоской поверхностью за счет использования закрутки потока. Исследуемая модель представлена на рис. 1.

Рабочий участок состоит из нагнетательной камеры поз. 3 (рис. 3), центрального сопла поз. 1, закручивающего устройства поз. 2, вставки поз. 4 и стенки поз. 5. Модель позволяет создать комбинированную импактную струю: в центре генерируется осевая струя, а вокруг неё за счет четырех сопловых тангенциальных подводов генерируется кольцевая закрученная струя. Воздух из нагнетательной камеры, через отверстия во вставке 4 поступает в центральное цилиндрическое сопло и истекает в пространство между внутренней стенкой камеры нагнета-

ния и исследуемой поверхностью для импактного натекания. Другая часть воздуха из камеры нагнетания поступает через 4 тангенциальных сопла в кольцевую щель, образованную центральным соплом 1 и цилиндрической поверхностью закручивающего устройства.

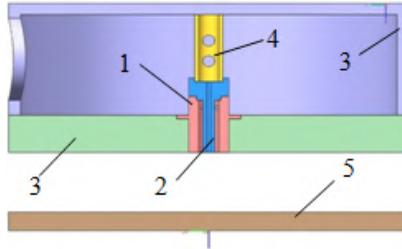


Рис. 1. Исследуемая модель: 1 – закручивающее устройство; 2 – центральное сопло; 3 – стенки камеры нагнетания; 4 – вставка; 5 – исследуемая стенка

Рабочий участок состоит из нагнетательной камеры поз. 3 (рис. 3), центрального сопла поз. 1, закручивающего устройства поз. 2, вставки поз. 4 и стенки поз. 5. Модель позволяет создать комбинированную импактную струю: в центре генерируется осевая струя, а вокруг неё за счет четырех сопловых тангенциальных подводов генерируется кольцевая закрученная струя. Воздух из нагнетательной камеры, через отверстия во вставке 4 поступает в центральное цилиндрическое сопло и истекает в пространство между внутренней стенкой камеры нагнетания и исследуемой поверхностью для импактного натекания. Другая часть воздуха из камеры нагнетания поступает через 4 тангенциальных сопла в кольцевую щель, образованную центральным соплом 1 и цилиндрической поверхностью закручивающего устройства.

Результаты расчета представлены на рис. 2. Периферийная закрученная струя расширяется при выходе из сопла и воздействует на большую площадь поверхности исследуемой стенки.

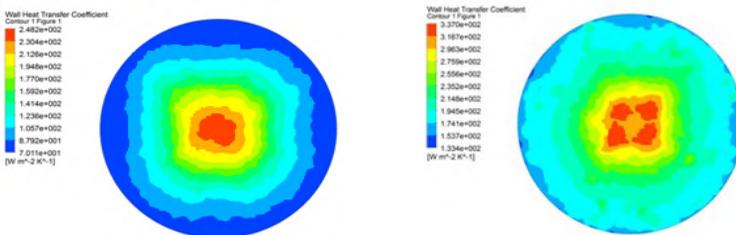


Рис. 2. Распределение коэффициентов теплоотдачи на исследуемой поверхности: слева простая одиночная струя; справа комбинированная струя

Результаты экспериментального исследования показали (рис. 3), что максимальные коэффициенты теплоотдачи в центральной части пластины имеют место при натекании комбинированной струи и $H/D=1$ (порядка $1100-1200 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$), а наименьшие – при натекании закрученной струи (порядка $200-400 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$).

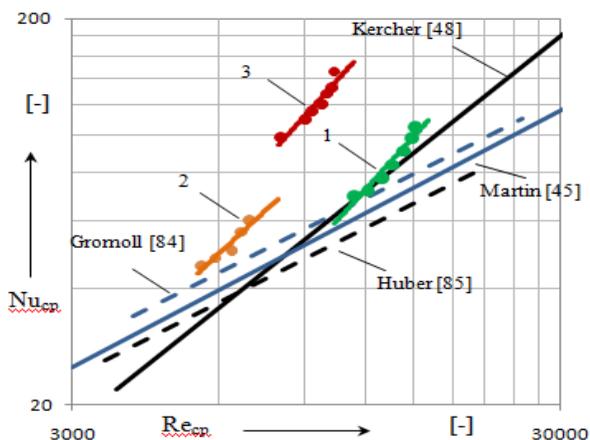


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных с известными литературными данными, полученными для осевых импактных струй: 1 – данные эксперимента для осевой струи при $H/D=2$, 2 – данные эксперимента для закрученной струи при $H/D=2$, 3 – данные эксперимента для комбинированной струи при $H/D=2$

Область воздействия комбинированной струи на обтекаемую поверхность больше на 10-30% по сравнению с осевой струей. Увеличение расстояние от среза сопла до исследуемой поверхности с $H/D=1$ до $H/D=8$, для всех струй, приводит к расширению области активного воздействия потока на поверхность, однако, средняя интенсивность теплообмена при этом падает на 50-70%. За счет применения комбинированной струи, можно добиться увеличения теплоотдачи в центре пластины на 20-30%.

Литература

1. Теплообмен при взаимодействии струй с преградами / Б.Н. Юдаев, М.С. Михайлов, В.К. Савин. М. Машиностроение, 1977. 305с.
2. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел. / Е.П. Дыбан, А.И. Мазур. Киев: Наукова думка, 1982. 303с.
3. Sunden B., Larocque J. Simulation of heat transfer from swirling impinging jets. // Proceedings of GT2005, ASME Turbo Expo 2005, № GT2005-68896. P. 8.

УДК 621.45.022.2

В.В. КОНОНОВА¹, студент, А.И. ГУРЬЯНОВ², д.т.н., доцент

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева

152934 г. Рыбинск, ул. Пушкина 53

E-mail: kononova.93@yandex.ru¹, marialex2004@mail.ru²

Экспериментальное исследование горения смешанного и синтетического топлива в противоточном горелочном модуле

Аннотация: в ходе работы был проведен комплекс экспериментальных исследований по горению смешанного и синтетического топлива в условиях газодинамического противотока и обоснована целесообразность создания форсуночно-горелочных устройств камер сгорания, работающих на синтез-газе.

Ключевые слова: синтез-газ, форсуночно-горелочный модуль, эмиссия, газодинамический противоток.

V.V. KONONOVA ¹, student,
A.I. GURYANOV ², doctor of engineering

Rybinsk State Aviation Technical University named after P. A. Solovyov
152934, Rybinsk, Pushkin st., 53

E-mail: kononova.93@yandex.ru¹, marialex2004@mail.ru²

Experimental study of the combustion of mixed and synthetic fuel in a countercurrent burner module

Abstract: In the course of the work a complex of experimental studies on combustion of mixed and synthetic fuel under conditions of gas-dynamic counterflow was carried out, and the expediency of creating nozzle-burner devices of combustion chambers working on synthesis gas was substantiated.

Key words: Synthesis gas, nozzle-burner module, emission, gas-dynamic counterflow.

Основной проблемой на пути создания высокоэффективных горелочных устройств для камер сгорания энергоустановок и газотурбинных двигателей, а также устройств сжигания топлива технологического назначения с применением современных энергосберегающих технологий, является обеспечение высококачественного распыла и эффективного смешения, в максимально короткой и теплонапряженной зоне горения, позволяющих приблизиться к физической модели гомогенного реактора. Поиск путей совершенствования организации процесса горения, требует новых научно-технических решений, в основе которых лежат оригинальные физические явления и реализующие их устройства. К числу таких физических явлений относится эффект Ранка-Хилша, и, соответствующая ему термогазодинамическая структура

закрученного потока. Существует отдельный класс закрученных потоков, при движении которых в ограниченном пространстве осесимметричных каналов формируется аэродинамический противоток, или, как его называют реверс течения. Такие потоки называют противоточными [1-3]. Переход на новый принцип организации горения в камере сгорания газотурбинной установке, лишенный большинства недостатков схем бедного горения, в том числе и с использованием синтез-газа, возможен на основе противоточной газодинамической схемы организации смешения и горения в камере. Общими проблемами создания горелочных устройств и камер сгорания является: обеспечение высокой полноты сгорания топлива (не менее 99,99%); сокращение выбросов загрязняющих атмосферу веществ при минимальных размерах зоны горения; снижение вероятности срыва пламени и расширение концентрационного диапазона устойчивого горения. Однако на настоящий момент отсутствуют как эффективные конструкции таких устройств, так и адекватные проверенные экспериментально методики их расчета и проектирования. Это определяет актуальность работ, посвященных вопросам проектирования камер сгорания, работающих на синтез-газе.

В ходе изучения физико-химических свойств смешанного топлива и синтез-газа было установлено, что объемная и массовая теплота сгорания топливно-воздушной смеси уменьшается по линейной зависимости при увеличении объемной доли синтез-газа в ней (рис. 1). Это обусловлено тем, что в состав синтетического топлива, подаваемого в противоточный горелочный модуль, входит молекулярный азот, процентное содержание которого по объёму составляет 49,11%. Он является инертной примесью и уменьшает процентное содержание горючих компонентов, а также снижает количество энергии, выделяющейся при сгорании единицы массы или объёма синтез-газа.

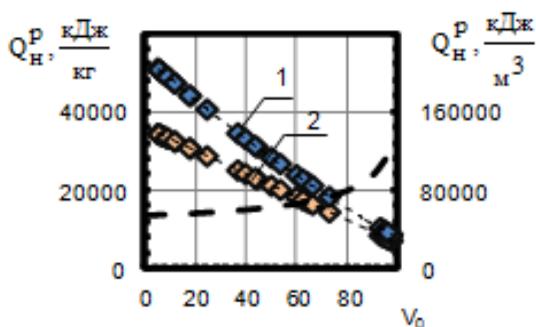


Рис. 1. График зависимости нижней теплоты сгорания топливной смеси метана с синтез-газом от объемного стехиометрического коэффициента: 1 – массовая теплота сгорания смеси; 2 – объемная теплота сгорания смеси

В ходе экспериментов по горению смешанного топлива (синтез-газ и метан) было отмечено, что добавка синтез-газа в диапазоне от 7% до 80% сопровождается скачкообразным расширением концентрационного диапазона устойчивого горения более чем в 4 раза в количественном выражении по сравнению с метаном. Результаты эмиссионных исследований по сжиганию топлива показали, что перевод устройств горения на синтетический газ сопровождается двукратным снижением эмиссии оксидов азота во всем концентрационном диапазоне устойчивого горения, относительно горения метана. Объемная доля целесообразной добавки синтез-газа, составляющая 15%, позволяет сократить эмиссию оксидов азота при горении в условиях газодинамического противотока в 1,5 раза относительно горения метана во всем диапазоне по коэффициенту избытка воздуха (рис. 2). Эмиссия несгоревших углеводородов в богатой области горения уменьшается 7,7 раз, в области бедного горения снижается в 1,8 раза, в случае стехиометрического горения концентрация уменьшается в 42 раза. Эмиссия монооксидов углерода в области бедного горения снижается в 1,7 раза, в области богатого горения в 4 раза, в случае стехиометрии в 2,5 раза (рис. 3).

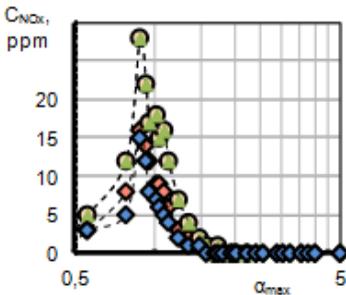


Рис. 2. Зависимость относительной концентрации NO_x в продуктах сгорания от коэффициента избытка воздуха: 1 – при сжигании чистого метана; 2 – при сжигании смеси (метан и синтез-газ) с объемной долей добавки синтез-газа равной 15%; 3 – при сжигании чистого синтез-газа

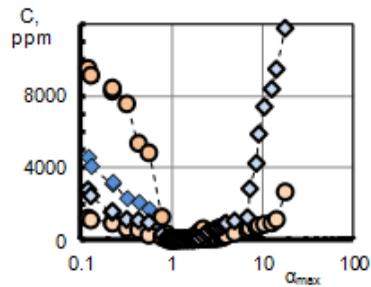


Рис. 3. Зависимость относительной концентрации вредных веществ в продуктах сгорания от коэффициента избытка воздуха: 1 – концентрация C_{xH_y} при сжигании чистого метана; 2 – концентрация CO при сжигании чистого метана; 3 – концентрация CO при сжигании чистого синтез-газа; 4 – концентрация C_{xH_y} при сжигании чистого синтез-газа

Выполненный комплекс экспериментальных исследований показывает целесообразность сжигания смесей метана с синтез-газом для снижения эмиссии NO_x , CO и C_xH_y относительно горения чистых газов (метана) и организации низкоэмиссионного сжигания топливных смесей синтетических газов в перспективных камерах сгорания газотурбинных

двигателей энергетического применения российского производства Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ №16-08-00974 «Развитие модельного описания тепломассообменных процессов в закрученных ограниченных течениях и его применение при создании устройств перспективных технологий».

Литература

1. **Пиралишвили, Ш. А.** Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения [Текст] / Ш. А. Пиралишвили, В. М. Поляев, М. Н. Сергеев; под ред. Леонтьева А. И. – М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. – 412 с.
2. **Гупта, А.** Закрученные потоки: пер. с англ. [Текст] / А. Гупта, Д. Лилли, Н. Сайред. – М.: Мир, 1987. – 588 с.
3. **Законы горения** [Текст]; под общ. ред. Ю. В. Полежаева. – М.: Энергомаш, 2006. – 352 с.

УДК 669.046:536.7

Е.М. ЗАПОЛЬСКАЯ¹, соискатель,
А.В. ФЕОКТИСТОВ², к.т.н., доцент
М.В. ТЕМЛЯНЦЕВ³, д.т.н., профессор

Сибирский государственный индустриальный университет
654007 г. Новокузнецк, ул. Кирова 42
E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru¹, umu@sibsiu.ru², uchebn_otdel@sibsiu.ru³

Оценка тепловой эффективности стенов высокотемпературного разогрева сталеразливочных ковшей различной емкости

Аннотация. Проведено исследование влияния геометрических размеров сталеразливочных ковшей на тепловую эффективность стенов разогрева.

Ключевые слова: футеровка, разогрев, сталеразливочные ковши.

Е.М. ZAPOLSKAYA, degree candidate,
А.В. FEOKTISTOV, candidate of Engineering, associate professor,
М.В. TEMLYANTSEV, Doctor of Engineering, professor
Siberian state industrial University
654007 Novokuznetsk, Kirova St., 42
E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru¹, umu@sibsiu.ru², uchebn_otdel@sibsiu.ru³

Evaluation of the thermal efficiency stands high temperature heating of casting ladles of various capacities

Abstract: the influence of the geometric dimensions of the ladle thermal efficiency of stands of warm-up.

Key words: lining, reheating, steel casting ladles.

В настоящее время на металлургических предприятиях применяют в основном высокотемпературный (1100–1200°C) разогрев футеровок

сталеразливочных ковшей. Его проводят на специальных стендах, отапливаемых как правило природным газом. От тепловой эффективности стенда во многом зависит экономичность его работы и себестоимость производимой стали. В связи с этим исследование влияния различных факторов на тепловую эффективность стендов является актуальной задачей, имеющей важное практическое значение.

В Сибирском государственном индустриальном университете разработана комплексная, детерминированная математическая модель тепловой работы стендов для разогрева футеровок сталеразливочных ковшей [1]. Она имеет блочную структуру, включающую следующие основные (укрупненные) блоки: 1 – расчет процессов теплогенерации; 2 – расчет внешнего теплообмена излучением и конвекцией во внутреннем пространстве ковша; 3 – расчет внутреннего теплообмена, нестационарных температурных полей в футеровке; 4 – расчет глубины обезуглероженного слоя футеровки; 5 – расчет теплового баланса процессов разогрева футеровки и охлаждения расплава.

Модель позволяет исследовать влияние различных факторов на тепловую эффективность стендов. На ее основе проведено исследование влияния емкости ковша на технико-экономические показатели работы стенда.

Многовариантные расчеты с применением этой модели осуществляли на примере разогрева сталеразливочных ковшей номинальной емкостью E , равной 90, 130, 220, 350 и 480 т, имеющих различные геометрические размеры [2]. Принимали, что стенд отапливается природным газом. В качестве основного расчетного режима приняли разогрев с постоянной, максимально допустимой по условиям трещинообразования скоростью увеличения температуры поверхности рабочего слоя, которая по рекомендациям производителей огнеупоров алюмопериклазоуглеродистых марок находится на уровне 50–60 °С/ч. Соответственно время τ разогрева (от 0 до 1200 °С) предварительно высушенной футеровки приняли 24 ч.

При оценке тепловой эффективности работы стендов для разогрева ковшей различной емкости, с футеровкой различной конструкции и применяемых для ее выполнения огнеупоров и теплоизоляции, отапливаемых газом различной калорийности возникают определенные трудности, так как часовой расход газа или суммарный объем газа на разогрев не являются информативными показателями. В связи с этим возникает необходимость в показателе, характеризующем экономичность его работы и отражающем удельные затраты топлива на разогрев, отнесенные к единице массы стали, транспортируемой в ковше [3]. При разработке такого параметра за основу принят удельный расход условного топлива, затрачиваемого на тепловую обработку тонны стали, используемый при оценке экономичности и эффективности тепловой работы металлургических печей. Для стендов разогрева в общем слу-

чае удельный расход условного топлива на тонну транспортируемой стали может быть определен по соотношению

$$B_{уд} = \frac{Q_p^H}{29,3} \frac{Q}{(E - M_{ш})}, \quad (1)$$

где Q_p^H – теплота сгорания топлива (природного газа), МДж/м³; Q – суммарный объем газа, затрачиваемого на разогрев, м³.

Если разогрев производится при постоянном расходе топлива, то расчет можно производить по следующему уравнению:

$$B_{уд} = \frac{Q_p^H}{29,3} \frac{B_T}{(E - M_{ш})}, \quad (2)$$

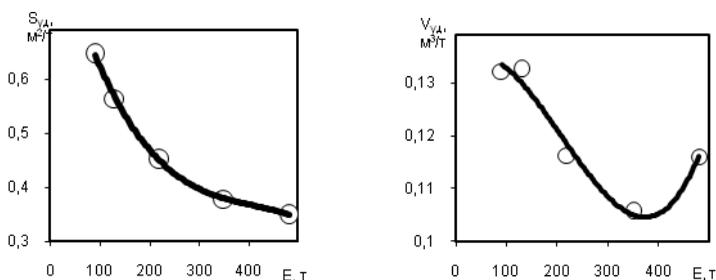
где B – средний расход топлива за период разогрева, м³/ч.

Проведенный анализ взаимосвязи геометрических характеристик ковша, тепловых параметров и массы транспортируемой стали показывает [4], что для ковшей меньшей емкости характерны более высокие потери тепла теплопроводностью через кладку, достигающие для 90-т ковшей 6,5–8,8 %, а для 480-т – 2,2–2,7 %, и меньший расход тепла на аккумуляцию его футеровкой, который составляет 36,5–49,0 и 46,7–55,9 % соответственно.

Вследствие меньшей толщины рабочего и арматурного слоев для ковшей малой емкости характерна более высокая температура кожуха, в частности для ковшей емкостью 90, 130, 220, 350 и 480 т она составляет соответственно 306, 300, 287, 248 и 198 °С, как следствие – более высокие теплотери теплопроводностью. В то же время, важное значение имеют объем (или масса, влияющая на теплосодержание) футеровки и площадь поверхности кожуха, предопределяющая теплотери в окружающую среду.

На рис. а и б представлена зависимость удельных площади $S_{уд}$, м²/т, поверхности кожуха и объема $V_{уд}$, м³/т, т.е. отношения площади поверхности кожуха и объема футеровки к номинальной емкости ковша. Для ковшей исследуемых емкостей удельная площадь снижается в 2 раза, а удельный объем почти не изменяется. В связи с этим, если не принимать во внимание различие теплового состояния футеровок ковшей различной емкости, меньшие значения удельного расхода топлива для ковшей большей емкости связаны в первую очередь с меньшей удельной площадью поверхности кожуха.

Таким образом, тепловая эффективность и экономичность стенов разогрева зависят прямо пропорционально от емкости сталеразливочных ковшей.



а)

б)

Рис. Зависимости удельной площади поверхности кожуха (а) и объема (б) от емкости ковша

Полученные данные хорошо согласуются с теорией и практикой конструирования и эксплуатации промышленных печей, которые показывают, что с увеличением емкости, производительности или садки печей удельные расходы топлива на единицу обрабатываемого материала снижаются.

Литература

1. **Матвеев М.В.**, Темлянцев М.В., Запольская Е.М., Костюченко К.Е. Разработка математической модели тепловой работы стенов разогрева футеровок сталеразливочных ковшей // Сб. на-уч. тр. Вестник Горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2013. Вып. 31. С. 31 – 44.
2. **Стариков В.С.**, Темлянцев М.В., Стариков В.В. Огнеупоры и футеровки в ковшевой металлургии. – М.: Изд-во МИСИС, 2003. – 328 с.
3. **Запольская Е.М.**, Темлянцев М.В., Костюченко К.Е. / Анализ основных направлений повышения энерготехнологической эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей // Вестник РАЕН (Западно-Сибирское отделение). 2013. Вып. 15. С. 128 – 134.
4. **Запольская Е.М.**, Темлянцев М.В., Костюченко К.Е. / Влияние геометрических размеров и емкости сталеразливочных ковшей на тепловую эффективность стенов высокотемпературного разогрева // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. 2013. № 2(4). С. 28 – 32.

УДК 669.013

Н.В. ГРЕБНЕВА¹, магистрант, Н.А. ЧЕРЕМИСКИНА, магистрант,
В.А. ДУДКО, магистрант, Е.В. КИСЕЛЕВ, к.т.н., доцент,
Н.Б. ЛОШКАРЕВ, к.т.н., доцент, В.В. ЛАВРОВ, д.т.н., профессор

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
620002 г. Екатеринбург, ул. Мира 19
E-mail: n.v.grebneva@urfu.ru

Решения по модернизации кольцевой печи ОАО «ЧТПЗ» с целью интенсификации процессов теплообмена

Аннотация: приведен анализ тепловой работы кольцевой печи для нагрева трубных заготовок ОАО «ЧТПЗ». Выявлены недостатки существующей системы утилизации тепла и предложены мероприятия для решения существующих проблем. Приведены ожидаемые результаты проведения реконструкции печных систем и узлов.

Ключевые слова: кольцевая нагревательная печь; нагрев трубных заготовок; ресурсосбережение; энергосбережение; регенеративная горелочное устройство; реконструкция печи.

N.V. GREBNEVA¹, graduate student, N.A. CHEREMISKINA, graduate student,
V.A. DUDKO, graduate student, E.V. KISELEV, Ph. D., associate professor,
N.B. LOSHKAREV, Ph. D., associate professor,
V.V. LAVROV, Doctor of Engineering, Professor

Ural Federal University after the first President of Russia B. N. Yeltsin
620002, Ekaterinburg, Mira St. 19
E-mail: n.v.grebneva@urfu.ru

Solutions for modernization of the ring oven «CHELPIPE» with the purpose of intensification of thermal transfer processes

Abstract: article gives an analysis of the thermal operation of the annular furnace for heating pipe billets of Chelyabinsk Pipe Rolling Plant. The shortcomings of the existing heat recovery system have been identified and measures have been proposed to solve existing problems. The expected results of reconstruction of furnace systems and assemblies are given.

Key words: ring heating furnace; heating of pipe blanks; resource saving; energy saving; regenerative burner device; reconstruction, resource conservation.

Кольцевые печи применяют главным образом для нагрева заготовок при прокатке труб, колёс и бандажей железнодорожного подвижного состава, для термической обработки металлических изделий, а также для нагрева заготовок из цветных металлов перед прокаткой и высадкой.

В трубопрокатном цехе №2 ОАО «ЧТПЗ» работает печь с кольцевым подом для нагрева трубной заготовки перед раскроем. Заготовки,

лежащие неподвижно на вращающемся поду, вместе с подом проходят все необходимые зоны нагрева и выдаются через окно выдачи, расположенное рядом с окном загрузки.

В настоящее время при эксплуатации данной печи выявлены следующие проблемы: высокий удельный расход топлива на нагрев заготовок, высокие температуры наружных поверхностей стен и свода, низкая скорость нагрева заготовки, большой объем подсосов воздуха в рабочее пространство печи. Кроме того, конструкция газогорелочных устройств не предусматривает возможности регулирования в большом диапазоне нагрузок, вплоть до периодического полного отключения, а тепловая энергия отходящих газов практически не используется.

В цехе существует ванна нагрева заготовки, в которой заготовка греется паром. Эта операция особенно актуальна для неприрывнолитой заготовки (НЛЗ), так как НЛЗ при раскрое более склонна к образованию трещин. Ванна нагрева заготовки является единственным потребителем пара в ТПЦ-2, часто для поддержания температуры в ванной приходится поднимать давление пара выше разрешенного по паспорту, для чего запускается дополнительный котел. В то время как тепловая энергия отходящих от кольцевой печи газов выбрасывается в атмосферу.

В целях повышения уменьшения тепловых потерь кольцевой нагревательной печи необходимо произвести совершенствование ее конструкции (в т.ч. с использованием современных огнеупорных материалов) и режима работы. В частности, реконструкция печи позволит:

- снизить удельный расход топлива на нагрев заготовок на 10%-20%;

- улучшить качество нагрева заготовки: обеспечить перепад температур по поверхности заготовки не более 5°C, по сечению не более - не более 10°C и снизить процент брака, связанного с недогревом заготовки;

- уменьшить потери металла, связанные с повышенным окалинообразованием, снизив угар металла с 2,4 % до 2% (на всем сортаменте заготовок);

- снизить температуры наружных поверхностей стен: величина составит не более 80°C, а на своде – не более 100°C;

- выполнить механизацию процесса удаления окалины для ее максимального удаления из печи;

- увеличить скорость нагрева заготовки диаметром до 170 мм включительно;

- при наличии технической возможности отказаться от водоохлаждаемых элементов в печи;

- предусмотреть возможности регулирования газогорелочных устройств в большом диапазоне нагрузок, вплоть до периодического полного отключения;

- снизить объем подсосов окружающего воздуха в рабочий объем печи;

– максимально использовать тепловую энергию отходящих дымовых газов, в том числе, для решения проблемы разогрева заготовок перед раскроем и отказа от пара в цехе.

Проект реконструкции должен предусматривать модернизацию всей печи, с применением современных жаропрочных материалов, несущих металлических конструкций и элементов с длительным сроком службы, а также применение современных контрольно-измерительных приборов, системы регулирования и поддержания температуры, расхода газа и воздуха, переоборудование системы отопления (в том числе замена существующих горелок на регенеративные, а также системы автоматики).

При эксплуатации печи основной и самой важной проблемой является потеря тепловой энергии. Поэтому потенциал энергосбережения в данном случае может быть очень велик, а использование этого потенциала сократит издержки предприятия. Для повышения тепловых показателей работы печи было решено использовать регенеративные горелочные устройства. Схема работы регенеративной горелки представлена на рис. 1.

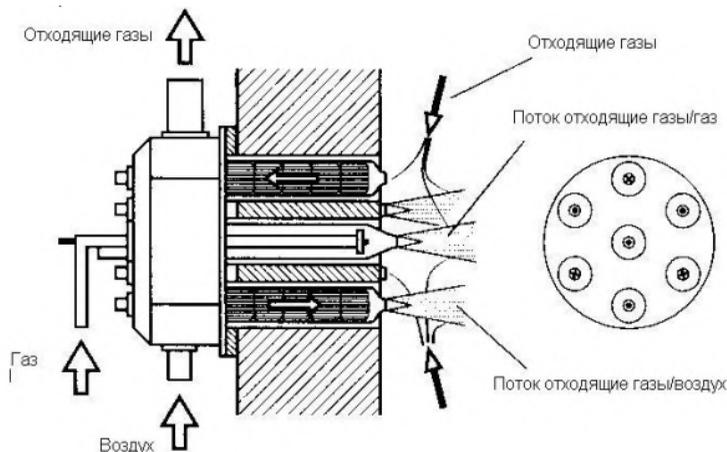


Рис. 1. Схема регенеративной горелки

Особенностью регенеративной горелки является очень высокий подогрев воздуха на горение, благодаря чему достигается высокий КИТ – до 90%. Кроме того, дополнительный подогрев воздуха для горения обеспечит снижение уровня NOx в отходящих газах. При температуре отходящих из печи газов около 1000 °С

величина NO_x составит порядка 25 ppm, т.е. лишь десятую часть законодательно разрешенного значения.

Таким образом, комплексный эффект от реализации предложенных мер будет заключаться в сокращении потребления топливно-энергетических ресурсов при нагреве трубной заготовки.

УДК 669.162.12

В.И. МАТЮХИН¹, к.т.н. доцент,
В.А. ДУДКО², магистрант,
Н.В. ГРЕБНЕВА³, магистрант

Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19
E-mail: matyhin53@mail.ru¹, v.a.dudko@urfu.ru², n.v.grebneva@urfu.ru³

Интенсификация теплообмена при обжиге сидеритовой мелочи

Аннотация: представлены результаты исследований обжига сидеритовой мелочи с углеродсодержащей добавкой, тепловые эффекты и температурные интервалы протекания реакций.

Ключевые слова: сидериты, торф, технологические стадии, обжиг.

V.I. MATYUKHIN Candidate of Science, associate professor,
V.A. DUDKO graduate student,
N.V. GREBNEVA graduate student

Ural Federal University name of the first president of Russia B. N. Yeltsin
620002 Ekaterinburg, Myra St., 19
E-mail: matyhin53@mail.ru¹, v.a.dudko@urfu.ru², n.v.grebneva@urfu.ru³

Intensification of heat transfer during firing of siderite fines

Abstract: the results of firing tests of siderite fines with a carbon-containing additive, thermal effects and temperature intervals of reactions are presented.

Key words: Siderites, peat, technological stages, roasting.

По существующей технологии переработки железных руд на Бакальском рудоуправлении основным видом товарной продукции является концентрат обожженного сидерита (КОС) для агломерации, получаемый после окислительного обжига кусковой фракции 13–80 мм в шахтной печи, ее магнитной сепарации и дробления до агломерационной крупности 10–0 мм. В руднике выход кондиционной руды достигает не более 20–25%. Образующаяся в цикле подготовки карьерной и шахтной руды к обжигу мелкая фракция размером 13–0 мм, не может быть использована в шахтных печах без дополнительной подготовки из-за существенного снижения газопроницаемости обжигаемого слоя. Основная

масса этих компонентов остается не востребованной и складывается на Бакальском рудоуправлении.

Для решения этой проблемы был осуществлен обжиг мелкой фракции сидеритовой руды и углеродсодержащей добавки (торфа).

Экспериментальные исследования массообменных процессов на опытной установке (рис.1), которая состоит из основных узлов: блока газоподготовки, нагревательной печи мощностью 10кВт с системой управления, кварцевой реакционной камеры, конструкция которой, в зависимости от характера поставленной задачи, может изменяться.

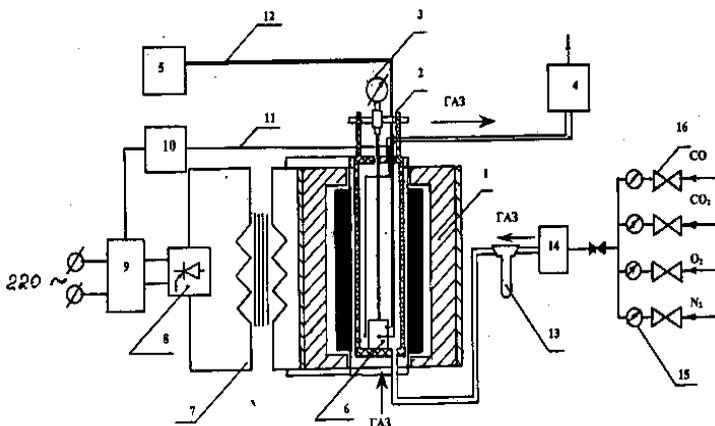


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки:

1 - печь сопротивления; 2 - кварцевая колба; 3 - индикатор изменения линейных размеров образца; 4- газоанализатор отходящих газов (ГХП-3); 5 - вторичный прибор - многоточечный потенциометр КСП-4; 6 - исследуемый образец; 7 - трансформатор; 8 - тиристорный блок мощности; 9- программатор температуры; 10- многоточечный потенциометр КСП-4; 11 - термопара ТПП для контроля за температурой рабочего пространства печи; 12 - термопары ТХА (для измерения температуры поверхности и центра образца); 13 - ротаметр; 14 - блок подготовки газовой смеси; 15 - газораздаточный пост.

В табл. 1 представлены основные результаты испытаний тепловых явлений. В табл. 2 приведены результаты экспериментальных исследований обжига сидеритовых образцов.

Таким образом, увеличение добавок торфа в составе исходных образцов сидеритов приводит к смещению подогривательной зоны в область пониженных температур с получением минимальной величины расширительных явлений при содержании торфа около 4,0%, повышением уровня требуемой температуры диссоциации сидеритов в область повышенных температур с усилением усадочных явлений до содержания торфа около 3,0%, смещением условий окисления закиси железа в область повышенных температур, но с усилением усадочных явлений вплоть до содержания торфа 3,0%. При этом стадия твердофазных реакций смещается в область пониженных температур с получением максимальной усадки при количестве добавок торфа около 3,0%. В тоже время, добавки торфа до 3,0% способствуют созданию более тугоплавкой структуры

обжигаемых материалов и максимальной усадки при содержании торфа около 3,0% [1].

Таблица 1. Основные результаты исследований тепловых явлений

Содержание торфа, %	Температура завершения процессов, °С				
	Сушки	Подогрева	Разложения сидеритов	Окисления FeO	Твердофазных процессов
0	76,9	361,4	284,5	630,1	268,7
1	76,8	319,6	242,8	624,5	304,9
5	83,4	341,1	257,7	628,5	287,4
10	87	342	255	629	287
Содержание торфа, %	Тепловой эффект, кДж/кг				
	Окисления торфа	Окисления закиси железа	Твердофазных реакций		
0	4,706	168,4	168,4		
1	86,81	73,09	125,7		
5	485,6	57,89	176,8		
10	785,1	60,45	174,3		

Таблица 2. Результаты dilatометрических исследований

Содержание торфа, %	Температура завершения процессов, °С					
	Сушки	Подогрева	Разложения сидеритов	Окисления FeO	Твердофазных реакций	Расплавления
0	76,19	497	616	779	930	1046
1	76,19	501	615	786	937,24	1057,14
3	76,19	475	622,3	779	895	1100
5	76,19	490	630	786	930	1037
Содержание торфа, %	Изменение линейных размеров по завершении процессов, %					
	Сушки	Подогрева	Разложения сидеритов	Окисления FeO	Твердофазных реакций	Расплавления
0	-0,1	4,92	0,15	-0,9	-12,5	-11,2
1	-0,1	4,8	0,31	0,05	-10	-8,6
3	-0,05	4,1	-0,41	-6,2	-21	-24
5	0,01	4,2	-0,1	-1,9	-12,4	-1,95

Проведенные экспериментальные исследования доказывают целесообразность использования углеродсодержащей добавки при обжиге сидеритов во вращающихся и шахтных печах.

Литература

1. Исследование механизма и кинетики диссоциации бакальских сидеритов при термообработке / Юрьев Б.П., Меламуд С.Г. // Металлы, 1998 №3, с.3-9.

УДК 162.2:0043.94

Н.А. ЧЕРЕМИСКИНА, магистрант,
Н.В. ГРЕБНЕВА, магистрант, Н.Б. ЛОШКАРЕВ, к.т.н., доцент,
Е.В. КИСЕЛЕВ, к.т.н., доцент,
В.В. ЛАВРОВ, д.т.н., профессор

Уральский федеральный университет имени первого Президента РФ Б.Н. Ельцина
620002 г. Екатеринбург, ул. Мира, 28
E-mail: n_cheremiskina@mail.ru

Печь непрерывного действия барабанного типа для нагрева проката

Аннотация. Изложен принцип работы термической барабанной печи под закалку и отпуск с учетом ресурсо- и энергосбережения. Представлена принципиальная схема устройства. Приводятся технические характеристики печи.

Ключевые слова: барабанная печь непрерывного действия; рекуперативное горелочное устройство; ресурсосбережение.

N.A. CHEREMISKINA, graduate student,
N.V. GREBNEVA, graduate student,
N.B. LOSHKARIOV, candidate of Engineering, docent,
E.V. KISELEV, candidate of Engineering, docent,
V.V. LAVROV., candidate of Engineering, professor

Ural Federal University named after the first President of RF B.N.Yeltsin
620002 Yekaterinburg, Mira st., 28
E-mail: n_cheremiskina@mail.ru

The drum continuous furnace for heating rolled under quenching

Abstract. The principle of operation of a rotary kiln with consideration of resource and energy saving describes at this article. A schematic diagram of the device is presented. Technical characteristics of the furnace are applied.

Key words: drum continuous furnace; regenerative burner device; resources.

Одним из основных этапов получения готового металлопроката и металлоизделий является термообработка. До сих пор большинство нагревательных печей имеют низкий КПД. Это связано с тем, что в данных нагревательных агрегатах имеются большие потери тепла через кладку и сходящими из печи газами.

Одним из определяющих факторов конструкции нагревательных и термических печей и системы их отопления является способ транспортировки в них металла. Основными способами транспортировки металла в термических печах являются роликовые и конвейерные поды. Такие конструкции имеют ряд недостатков. Роликовые печи для нагрева длинных заготовок, устанавливаемые в потоке прокатных станов,

имеют большую протяженность, поэтому их сложно размещать в действующих цехах.

Новый способ транспортировки проката в термических печах, существенно уменьшающий габариты печи, упрощающий механизмы транспортировки и не имеющий водоохлаждаемых элементов разработан учеными ОАО «ВНИИМТ» совместно с кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» Уральского федерального университета.

Транспортировка проката в процессе нагрева осуществляется с помощью вращающегося барабана револьверного типа из жаропрочной стали. В качестве примера использования описываемого способа транспортировки приведена конструкция печи для нагрева тракторных башмаков под закалку (рис. 1).

Башмаки в процессе транспортировки размещаются радиально по отношению к барабану в специальных гнездах с зацепами на наружной поверхности. Такой способ транспортировки обеспечивает равномерный двухсторонний нагрев металла, что, в свою очередь, за счет минимизации времени нагрева существенно сокращает габариты печи и угар металла. Металлоконструкции барабана выполнены из жаропрочной стали. Центральная часть барабана выполнена в виде спиц из жаропрочной стали и футерована волокнистыми огнеупорными материалами.

Вращение барабана производится шаговым двигателем, что обеспечивает установку барабана в положение «загрузка – выгрузка» с высокой точностью. Цапфы барабана и подшипниковые узлы вынесены за пределы рабочего пространства, что увеличивает срок их службы. Для обеспечения нормальных условий работы подшипниковых узлов применяется воздушное охлаждение вала барабана, выполненного в виде толстостенной трубы.

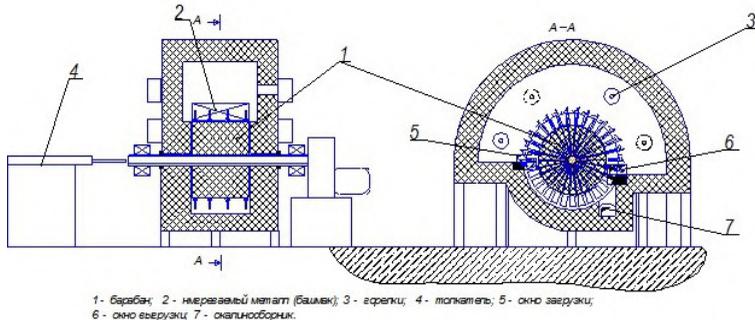


Рис. 1. Принципиальная схема барабанной печи

Отопление печи производится через автоматические скоростные рекуперативные горелки, позволяющие эффективно использовать

теплоту сгорания, подогревая воздух, идущий на горение, до высоких температур. Технические характеристики печи представлены в табл. 1.

Продукты сгорания удаляются через встроенные в горелки рекуператоры в сборный металлический, теплоизолированный дымопровод.

Свод печи и торцевые стены футерованы волокнистыми огнеупорными материалами, что способствует уменьшению потерь тепла теплопроводностью через футеровку печи в окружающую среду. Нижнее строение футеровано огнеупорным кирпичом.

Таблица 1. **Техническая характеристика термической печи**

№ п/п	Наименование		Ед. измерения	Показатели
1	Назначение печи		Нагрев под закалку башмаков гусениц	
2	Площадь пода печи		м ²	3,5
3	Установленная тепловая мощность печи		кВт	200
4	Топливо		Природный газ	
5	Расход газа на печь		м ³ /ч	20
6	Нагреваемые изделия	Длина	мм	510...1100
7		Высота	мм	171...280
8		Толщина (в самом толстом месте)	мм	22...45
9		Средняя масса	кг	20...43,5
10	Тип печи		Проходная, барабанная с двухсторонним нагревом	
11	Температура металла на выдаче из печи		°С	880 ± 10 °С
12	Количество башмаков в печи		шт.	21
13	Производительность		кг/ч	390...610
14	Топливосжигающие устройства	ГРС-150	шт.	4

Таким образом, разработанная конструкция печи позволяет экономить топливо, и занимать относительно небольшое место в цехе. Предложенная конструкция и способ транспортировки изделий в рабочем пространстве печи могут быть использованы для термообработки прутков, труб, полосы, а также сортового проката различной формы.

УДК 62-784.23:697.982

Л.А. ЗАЙНУЛЛИН^{1,2} д.т.н., профессор,
М.В. КАЛГАНОВ¹, научный сотрудник,
Д.В. КАЛГАНОВ¹, научный сотрудник,
Н.А. СПИРИН², д.т.н., профессор

¹ ОАО «Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники
ВНИИМТ» (620137, Россия, Екатеринбург, ул. Студенческая, 16)

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б.Н. Ельцина (620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 19)
E-mail: z1917@mail.ru

Исследование устройств воздушного охлаждения вращающегося вала печного высокотемпературного вентилятора

Аннотация. Разработана конструкция устройства воздушного охлаждения вала печного вентилятора многодискового типа. Получены зависимости конвективной теплоотдачи от поверхности этого устройства в окружающую среду трех типоразмеров.

Ключевые слова: печной вентилятор, конвективный теплообмен, устройство охлаждения вала вентилятора.

Research of air cooling devices of the rotating shaft of the furnace high-temperature fan

L.A. ZAINULLIN^{1,2}, Dr. Sci. (Eng.), Professor,
M.V. KALGANOV¹, Research associate,
D.V. KALGANOV¹, Research associate N.A. SPIRIN², Dr. Sci. (Eng.), Professor,

¹ OJSC «Scientific Research Institute of metallurgical heat engineering» (VNIIMT)
16, Studencheskaya str., Ekaterinburg, 620137, Russia

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
19, Mira str., Ekaterinburg, 620002, Russia

Abstract. The design of disc type furnace fan shaft air cooling device is developed. The dependences of convective heat transfer from the surface to the environment of devices in three sizes is obtained.

Keywords: furnace fan, convective heat transfer, fan shaft cooling device.

В ОАО «ВНИИМТ» совместно с УрФУ разработано инновационное устройство воздушного охлаждения вращающегося вала печного вентилятора многодискового типа (рис. 1).

На экспериментальном стенде ОАО «ВНИИМТ» были проведены исследования по определению эффективности тепловой работы разработанных устройств охлаждения. Геометрические размеры исследованных устройств, табл. 1, выбраны из условия использования их в наиболее часто применяемых конструкциях вентиляторов.

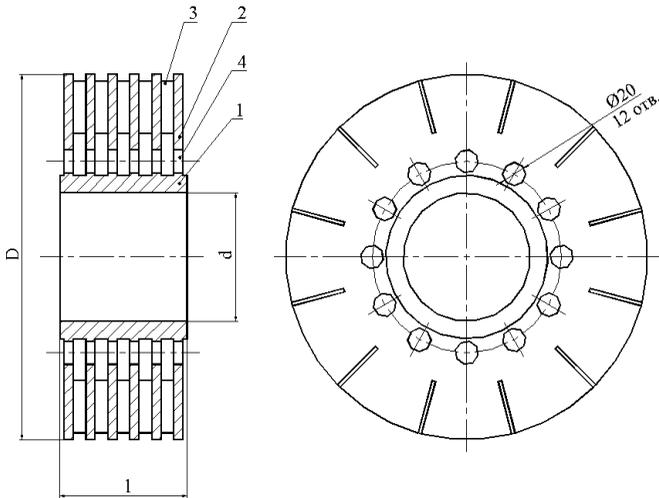


Рис. 1. Схема устройства воздушного охлаждения вала многодискового типа:
1 – втулка; 2 – диски; 3 – радиальные лопатки; 4 – впускные отверстия

Результаты исследований описываются следующими зависимостями.

Для устройства с внешним диаметром 313 мм (МД-313):

$$Nu = 0,02746 \cdot Re^{0,8} \quad (1)$$

Для устройства с внешним диаметром 290 мм (МД-290):

$$Nu = 0,03982 \cdot Re^{0,8} \quad (2)$$

Для устройства с внешним диаметром 250 мм (МД-250):

$$Nu = 0,05287 \cdot Re^{0,8} \quad (3)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot D}{\lambda_e}; Re = \frac{D \cdot W}{\nu} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot n}{\nu}$$

Здесь Nu - число Нуссельта; Re - число Рейнольдса; α – средний коэффициент теплоотдачи от открытой поверхности устройства охлаждения, Вт/(м²·К); D - внешний диаметр устройства, м; λ_e - коэффициент теплопроводности окружающей среды, Вт/(м·К); W - линейная скорость движения внешней образующей вращающегося устройства, м/с; n - угловая скорость вращения устройства, 1/с; ν – кинематический коэффициент вязкости окружающей среды, м²/с.

Таблица 1. Конструктивные размеры устройств охлаждения вала много-дискового типа

№ п/п	Наименование величины	Ед. изм.	Обозначение устройства		
			МД-313	МД-290	МД-250
1.	Внешний диаметр D	мм	313	290	250
2.	Диаметр вала вентилятора d	мм	110	110	110
3.	Отношение d/D		0,351	0,379	0,440
4.	Количество впускных отверстий в расчете на один диск	шт.	12	12	12
5.	Диаметр входного отверстия	мм	20	20	20
6.	Количество дисков	шт.	6	6	6
7.	Толщина диска	мм	8	8	8
8.	Расстояние между дисками	мм	11	11	11
9.	Длина втулки l	мм	110	110	110
10.	Теплообменная площадь устройства	м ²	0,8379	0,6879	0,4870
11.	Отношение площади впускных отверстий к площади выпускного сечения устройства		0,139	0,150	0,175
12.	Применяемый материал		ст. 45	ст. 45	ст. 45

Исследованные устройства не являются геометрически подобными между собой, поэтому численный коэффициент в приведенных зависимостях является величиной, зависящей от соотношения диаметров вала вентилятора и внешнего диаметра устройства d/D . Для удобства пользования полученными экспериментальными данными предложено обобщить зависимости (1-3) в виде:

$$Nu = C \cdot Re^{0,8} \quad (4)$$

где C – коэффициент пропорциональности, зависящий от соотношения d/D рассматриваемых устройств и описываемый в исследованном диапазоне изменения параметров следующим уравнением:

$$C = -0,4675 + 2,3074(d/D) - 2,5561 (d/D)^2 \quad (5)$$

Уравнение (5) справедливо в исследованном диапазоне изменения величины $0,351 \leq d/D \leq 0,44$.

УДК 621.311.22.002.5:621.184

И.Б. МУРМАНСКИЙ¹, аспирант,
К.Э. АРОНСОН, д.т.н., профессор,
А.Ю. РЯБЧИКОВ, д.т.н., профессор,
Д.В. БРЕЗГИН, к.т.н., Н.В. ЖЕЛОНКИН к.т.н.

Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б.Н. Ельцина
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
Email: lta_ugtu@mail.ru

Расчет конденсации перегретого пара в теплообменных аппаратах

Аннотация: разработана методика расчета теплообмена при конденсации перегретого пара. Основу методики составляет модель, определяющая перегретый пар как смесь неконденсирующегося (пар перегретый) и конденсирующегося (пар насыщенный) газов. Показано, что при конденсации перегретого пара коэффициент теплоотдачи снижается.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, методика расчета, конденсация перегретого пара.

I.B. MURMANSKII, postgraduate,
K.E. ARONSON, Doct. of Tech. Sci., professor,
A.U. RYABCHIKOV, Doct. of Tech. Sci., professor,
D.V. BREZGIN, Cand. of Tech. Sci.,
N.V. ZHELONKIN, Cand. of Tech. Sci., associate professor

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin
620002 Mira str. 19, Ekaterinburg, Russia
Email: lta_ugtu@mail.ru

Calculation of superheated steam condensation in heat exchangers

Abstract. A technique is developed of heat exchange calculation during condensation of superheated steam. The basis of the technique is a model defining superheated steam to be a mixture of incondensable (superheated steam) and condensable (saturated steam) gases. It is shown that when superheated steam is condensed, the heat transfer coefficient decreases.

Key words: heat exchanger, calculation procedure, superheated steam condensation.

В ряде теплообменных аппаратов паротурбинных установок поступающий в них пар перегрет относительно температуры насыщения, определяемой по давлению пара в аппарате. К таким аппаратам относятся последние по ходу основного конденсата подогреватели низкого давления, подогреватели высокого давления, вертикальные подогреватели сетевой воды и др. Величина перегрева в них достигает 150...200 К и более. Для разработки и проектирования теплообменных

аппаратов с конденсацией перегретого пара необходима надежная расчетная методика.

В докладе представлена методика расчета коэффициента теплоотдачи в теплообменных аппаратах с конденсацией перегретого пара, когда температура стенки трубок ниже температуры насыщения пара. Основу методики расчета составляет модель, определяющая перегретый пар как смесь неконденсирующегося (пар перегретый) и конденсирующегося (пар насыщенный) газов. Конденсируется на поверхности только пар насыщенный, а перегретый пар отдает теплоту перегрева при конденсации пара насыщенного и в результате конвективного теплообмена. Используя принцип соответствия, можно определить парциальные давления каждого из газов. Предложено считать парциальное давление пара, перегретого и насыщенного пропорциональным теплотам перегрева и фазового перехода. Учитывая также, что молекулярные массы пара, перегретого и насыщенного равны, объемные доли компонентов будут равны их массовым долям. Тогда

$$\frac{P_{\text{пп}}}{P_{\text{пн}}} = \frac{m_{\text{пп}}}{m_{\text{пн}}} = \frac{c_p \cdot \Delta T_{\text{пп}}}{r} = q_{\text{пп}}^*, \quad (1)$$

здесь $P_{\text{пп}}$, $P_{\text{пн}}$ – парциальные давления пара перегретого и насыщенного в смеси, Па; $\Delta T_{\text{пп}} = T_{\text{п}} - T_{\text{пн}}$ – разность между температурой пара и температурой насыщения, определяемой при парциальном давлении пара насыщенного, К; $m_{\text{пп}}$, $m_{\text{пн}}$ – масса пара перегретого, насыщенного, кг; $q_{\text{пп}}^*$ – относительная теплота перегрева пара.

Для расчета теплообмена при конденсации смеси паров – перегретого и насыщенного – неизвестной величиной предложено считать температуру на границе раздела фаз «смесь паров – пленка жидкости». Аналогичный подход применяется для обобщения экспериментальных данных при конденсации пара из парогазовой смеси «водяной пар – воздух» [1]. Такой подход позволяет разделить общее термическое сопротивление при конденсации пара из смеси газов на диффузионное сопротивление пограничного слоя и термическое сопротивление пленки жидкости, используя зависимости для каждого из сопряженных процессов.

Изменение концентрации неконденсирующегося газа (пара перегретого) по толщине диффузионного пограничного слоя при поперечном обтекании цилиндра парогазовой смесью с отсосом определяется по зависимости [1]:

$$\varepsilon_{\text{пп}}^* = \frac{\varepsilon_{\text{пп}}^\infty}{\varepsilon_{\text{пп}}^0} = \frac{1}{1 + 1.75 \cdot \beta \cdot Sc^{2/3} \cdot (1 + \beta \cdot Sc)}, \quad (2)$$

здесь $\varepsilon_{\text{пп}}^\infty$, $\varepsilon_{\text{пп}}^0$ – концентрация пара перегретого вдали и вблизи поверхности раздела фаз (пленки), соответственно. Концентрация пара перегретого вдали от границы раздела фаз согласно (1) определится

$$\varepsilon_{\text{III}}^{\infty} = \frac{c_p \cdot \Delta T_{\text{III}}}{r + c_p \cdot \Delta T_{\text{III}}} ; \quad (3)$$

β – коэффициент массоотдачи:

$$\beta = \frac{g_k}{F \cdot \rho_n \cdot U_{\text{II}}^{\infty}} \cdot \text{Re}_{\text{II}}^{1/2}, \quad (4)$$

здесь g_k – массовый расход сконденсировавшегося пара, кг/с; F – площадь поверхности теплообмена, м²; ρ_n – плотность перегретого пара, кг/м³; U_{II}^{∞} – скорость пара вдали от границы раздела фаз, м/с (в расчете теплообменника скорость газа принимается в узком сечении трубного пучка); $\text{Re}_{\text{II}} = U_{\text{II}}^{\infty} \cdot d_n / \nu_n$ – число Рейнольдса парового потока; d_n – наружный диаметр трубки, м; ν_n – коэффициент кинематической вязкости пара, м²/с; $\text{Sc} = \nu_n / D$ – число Шмидта, где D – коэффициент самодиффузии водяного пара, м²/с.

Коэффициент теплоотдачи определяется по известным зависимостям для процесса конденсации пара. В результате можно вычислить температуру на границе фазового перехода (пленки конденсата). Принимая, что температура поверхности пленки конденсата соответствует температуре насыщения при давлении пара насыщенного, можно определить концентрацию пара перегретого вблизи пленки

$$\varepsilon_{\text{III}}^0 = 1 - \frac{P_{\text{III}}}{P_{\text{II}}} \quad (6)$$

и сопоставить ее со значением $\varepsilon_{\text{III}}^0$ из выражения (2).

Результаты расчетов сопоставлялись с данными испытаний теплообменного аппарата, в паровом пространстве которого сформировано 4 зоны. Пар на входе в аппарат перегрет на $\Delta T_n = 140$ К относительно температуры насыщения. В первой зоне конденсируется около 20 % от общего количества пара, поступающего в аппарат. В целом в аппарате конденсируется 66 % от общего количества поступающего пара. Опытное значение данной величины равно 70 %. Изменение количества сконденсировавшегося пара от входа к выходу теплообменника почти линейно. Расчеты показали, что почти весь перегрев снимается практически на 80 % поверхности теплообмена, причем большая часть перегрева (около 67 %) снимается в первой зоне аппарата, составляющей 37 % от общей площади поверхности. На выходе из теплообменника пар незначительно (≈ 1 К) перегрет относительно температуры насыщения.

Проведенный анализ показал также, что при разности температур между температурой насыщения и температурой воды на входе в теплообменник $\Delta T_p = 1,4$ К коэффициент теплоотдачи при конденсации перегретого пара в зависимости от величины перегрева составляет от

60 до 20 % от значения коэффициента теплоотдачи при конденсации насыщенного пара. При $\Delta T_p > 6$ К влияние перегрева пара не столь существенно. Максимальное снижение теплоотдачи составляет от 18 до 32 %. Относительный коэффициент теплоотдачи при увеличении разности температуры перегрева пара (ΔT_n) снижается.

Расчеты показывают, что для располагаемой разности температур $\Delta T_p = 1,4$ К при $\Delta T_n > 150$ К конденсации пара в пучке не происходит, так как температура стенки трубки оказывается выше температуры насыщения пара.

Литература

1. **Гогонин И.И.** Исследование теплообмена при пленочной конденсации пара / И.И.Гогонин. Новосибирск: СО РАН, 2015. 236 с.

УДК 620.92.004.14: 621.1

А.Ю. КИРЕЕВ¹, аспирант,
И.Н. СВИСТУНОВ, аспирант,
С.К. ПОПОВ², д.т.н., профессор

Национальный исследовательский университет МЭИ
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14
E-mail: kireev.ay18081991@gmail.com¹, PopovSK@mpei.ru²

Экономия топлива в стекловаренной печи при использовании термохимической рекуперации

Аннотация: разработана математическая модель тепловой схемы стекловаренной печи, позволяющая исследовать эффективное использование конверсии природного газа в процессе термохимической рекуперации теплоты высокотемпературных отходящих газов.

Ключевые слова: термохимическая рекуперация, стекловаренная печь, конверсия природного газа.

A.Y. KIREEV postgraduate student,
I.N. SVISTUNOV postgraduate student,
S.K. POPOV Doctor of Engineering, professor

National Research University Moscow Power Engineering Institute
111250, Moscow, Krasnokazarmennay St., 14
E-mail: kireev.ay18081991@gmail.com¹, PopovSK@mpei.ru²

Reducing fuel consumption by using thermochemical regeneration

Abstract: a mathematical thermal circuit mode of a glass-melting furnace has been developed, which makes it possible to investigate the effective use of natural gas conversion in the process of thermochemical heat recovery of high-temperature off-gases.

Key words: thermochemical recuperation, glass furnace, conversion of natural gas

Актуальная проблема энергосбережения и повышения экологической эффективности высокотемпературных теплотехнологических установках (ВТУ) решается в нескольких направлениях, в том числе посредством рекуперации тепловых отходов.

В топливных ВТУ термохимическая рекуперация (ТХР) теплоты отходящих газов и других тепловых отходов может быть реализована на основе эндотермического процесса конверсии природного газа. При этом первичное топливо – природный газ – перерабатывается во вторичное топливо – синтез-газ, который используется (полностью или частично) для отопления печи.

Теплота отходящих газов, расходуемая на процесс конверсии, идет не только на повышение температуры природного газа, но и преобразуется в химически связанную энергию синтез-газа. Благодаря этому термохимическая рекуперация теплоты отходящих газов ВТУ может дать дополнительную экономию топлива по сравнению с традиционной термической рекуперацией и снижение вредного воздействия на окружающую среду.

Данная работа посвящена исследованию условий эффективного использования конверсии природного газа в процессе термохимической рекуперации теплоты высокотемпературных отходящих газов в стекловаренной печи с целью снижения удельного видимого расхода топлива.

В данном направлении исследование ТХР продвинулось в последнее время до уровня промышленных экспериментов на регенеративной стекловаренной печи производительностью 50 т/сутки [1–3].

По аналогии с коэффициентом расхода окислителя на процесс горения введем в рассмотрение коэффициент расхода окислителя на процесс конверсии

$$\alpha_{\text{конв}} = V_{\text{ок}}^{\text{конв}} / (V_{\text{ок}}^{\text{конв}})^0$$

как отношение действительного расхода окислителя $V_{\text{ок}}^{\text{конв}}$ к теоретическому. Величина $\alpha_{\text{конв}}$ представляет интерес при расчетном исследовании и анализе тепловых схем с ТХР.

Исследованиями установлено, что при использовании рециркулирующих уходящих газов в качестве окислителя для конверсии природного газа зависимость суммарных удельных энергозатрат на ВТУ от $\alpha_{\text{конв}}$ имеет немонотонный характер, причем минимум данной функции наблюдается при оптимальном значении $\alpha_{\text{конв}}^{\text{опт}}$, близком к 1,00. При отклонении $\alpha_{\text{конв}}$ от $\alpha_{\text{конв}}^{\text{опт}}$ в меньшую сторону энергозатраты увеличиваются из-за растущего дефицита окислителя на конверсию, что снижает энергосберегающий эффект ТХР. С ростом $\alpha_{\text{конв}}$ свыше $\alpha_{\text{конв}}^{\text{опт}}$ окислитель на конверсию подается в избытке, который не участвует в

ТХР и лишь увеличивает расход отходящих газов. Это приводит к росту энергозатрат на работу установки.

Полученный результат аналогичен известной зависимости удельных энергозатрат от коэффициента расхода окислителя на процесс горения.

Выполнено расчетное исследование тепловой схемы стекловаренной установки производительностью 50 т/сутки с ТХР на основе конверсии природного газа рециркулирующими уходящими газами с повышенным содержанием кислорода в окислителе для горения синтез-газа. Результаты исследования представлены на рис. 1.

Величина $b_{\text{сум}}$ определяется с учетом энергозатрат на выработку технического кислорода, который используется для получения заданного уровня K_{O_2} – объемной доли кислорода в окислителе. Минимуму

функции $b_{\text{вид}}$ ($\alpha_{\text{вид}}$) соответствуют оптимальные значения коэффициента расхода окислителя на процесс конверсии – $\alpha_{\text{конв}}^{\text{опт}}$.

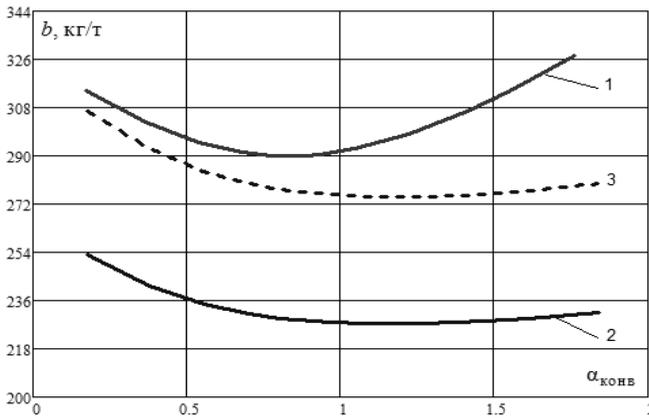


Рис. 1. Зависимость удельного видимого $b_{\text{вид}}$ и суммарного $b_{\text{сум}}$ расходов топлива в стекловаренной установке от $\alpha_{\text{конв}}$:

1 – $b_{\text{вид}}$ при $K_{\text{O}_2} = 0,21$; 2 – $b_{\text{вид}}$ при $K_{\text{O}_2} = 0,90$; 3 – $b_{\text{сум}}$ при $K_{\text{O}_2} = 0,90$

Переход к оптимальным значениям параметров, обеспечивающих оптимальное значение $\alpha_{\text{конв}}$, может обеспечить в рассмотренных условиях дополнительный энергосберегающий эффект до 10%.

Полученные данные могут быть использованы при выборе структурных и режимных параметров тепловых схем промышленных печей с термохимической рекуперацией тепловых отходов.

Литература

1. **Kobayashi H.** Thermochemical regenerative heat recovery process. US Pat. 6,113,874, Sep. 5, 2000.
2. **Kobayashi H., Wu K.T, Bell R.L.** Thermochemical Regenerator: A High Efficiency Heat Recovery System for Oxy-Fired Glass Furnaces // DGG/AcerS Conference, Aachen, May 28, 2014.
3. **Gonzalez A., Solorzano E.** OPTIMELT™ Regenerative Thermo-Chemical Heat Recovery for Oxy-Fuel Glass Furnaces // 75rd Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings, Vol. 36, Issue 1, 2015, p. 113–120.

УДК 621.783.237.001.573

О.И. ПОТАПОВА, студент,
С.К. ПОПОВ, д.т.н., профессор.
СТОГОВ П.А., инженер

Национальный исследовательский университет «МЭИ»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная 14
E-mail: potapovaolesa@mail.ru

Энергосберегающие мероприятия в технологии производства строительного кирпича

Аннотация: рассмотрены характеристики действующей теплотехнологической системы производства кирпича. Проведен теплотехнический аудит, определена энергоёмкость технологии, разработан ряд энергосберегающих мероприятий.

Ключевые слова: кирпичный завод, теплотехническое обследование, энергосбережение, сушило, туннельная печь, энергоёмкость

O.I. POTAPOVA student,
S.K. POPOV Doctor of Engineering, professor.
P.A. STOGOV engineer

National Research University "MPEI"
111250 Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14
E-mail: potapovaolesa@mail.ru

Energy-saving measures in the technology of building bricks production

Abstract. The characteristics of the existing heat-engineering system for the production of bricks are considered. Thermotechnical audit was carried out, the energy intensity of the technology was determined, and a number of energy-saving measures were developed.

Keywords: brick factory, thermal engineering inspection, energy saving, dried, tunnel furnace, energy capacity

Теплотехнологические системы (ТТС) производства строительного кирпича характеризуются существенной долей в себестоимости продукции затрат на природный газ, используемый как топливо, а также

негативным воздействием на окружающую среду. Экономия энергетических ресурсов рассматривается в настоящее время как важнейшая национальная экологическая и экономическая проблема. Мероприятия, обеспечивающие энергосбережение, имеют более высокую рентабельность по сравнению с наращиванием поставок энергоресурсов. Вследствие этого для указанных систем являются актуальными исследования в области повышения уровня энергосбережения и экологической эффективности.

Объектом исследования выбрана действующая теплотехнологическая система завода, производящего лицевой керамический кирпич. Выполнено теплотехническое обследование ТТС, в ходе которого собрана и систематизирована информация о конструктивных и режимных параметрах системы, о структуре энергетических и материальных потоков в ТТС.

Технологическая схема ТТС включает в себя восемь стадий: 1) добыча в карьере; 2) транспортировка на завод; 3) подготовка исходного материала, формование изделий, вакуумное прессование, 4) транспортировка к сушилке, укладка на вагонетки; 5) сушка; 6) сортировка, укладка на печные вагонетки; 7) нагрев, обжиг, охлаждение в печи; 8) выставка кирпича, разгрузка вагонеток, сортировка. Изменение энергоёмкости технологии производства продукта в системе (в расчете на первичное топливо) при последовательной реализации стадий показано на рис. 1. Как следует из представленных данных, наибольший прирост энергоёмкости наблюдается на стадиях сушки и обжига, поэтому поиск путей повышения энергоэффективности производства строительного кирпича следует сосредоточить на совершенствовании тепловой работы сушилки и туннельной печи.

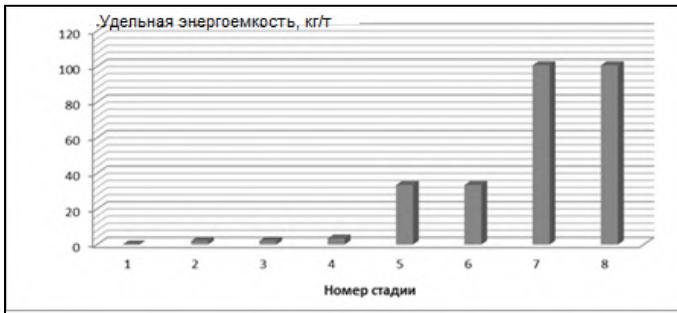


Рис. 1. Изменение удельной энергоёмкости полупродукта по стадиям ТТС

Выполненный анализ позволил сформировать две группы мероприятий. Первая группа мероприятий реализуется (и уже частично реализована) без заметных капитальных затрат, в то время как реализация

мероприятий второй группы сопряжена с дополнительными капиталовложениями и эксплуатационными издержками.

К мероприятиям первой группы относятся:

1) настройка режима работы горелок туннельной печи с целью обеспечения одинакового соотношения газ-воздух по всем горелкам.

2) Изменение конфигурации садки с целью повышения симметричности скоростного поля газов и улучшения ее газопроницаемости.

3) Регулирование аэродинамического режима печи, выполненное по результатам обследования, позволило обеспечить нулевое избыточное давление на границе зон обжига и охлаждения и исключить попадание дымовых газов и пылевидного уноса в поток, отбираемый из зоны охлаждения.

4) Выполнение режимных требований по зоне охлаждения: поддержание необходимого разрежения в точках отбора воздуха из зоны охлаждения. Это обеспечивает постоянный равномерный отбор горячего воздуха из зоны охлаждения.

Во вторую группу включен и исследован ряд энергосберегающих мероприятий. Одно из них – снижение теплоаккумулирующей способности вагонетки туннельной печи. Тепловой поток с вагонетками составляет 16 % в расходной части объединенного теплового баланса зон подогрева и обжига. С целью снижения этого теплового потока можно использовать другой материал для футеровки вагонетки, с более низкой объемной удельной теплоемкостью и теплопроводностью. Расчетное исследование выполнено в среде Mathcad [1, 2] для условий обследованной печи. Установленные зависимости удельного видимого расхода топлива и средней температуры футеровки вагонетки на выходе из зоны обжига в зону охлаждения от материала футеровки представлены в табл. 1.

Таблица 1. Зависимость удельного видимого расхода топлива и средней температуры футеровки вагонетки от материала футеровки

Материал	Шамот	ШКЛ-1,3	ШКЛ-1,0	ШЛ-0,9	ШЛ-0,4
Удельный расход топлива, кг/т	71,2	66,7	64,3	63,1	58,6
Температура футеровки, °С	675	641	610	597	547

Второе мероприятие – утилизация низкопотенциальной теплоты отборов (воздуха, отбираемого из зоны охлаждения) посредством реализации органического цикла Ренкина (ОЦР). В ОЦР используются альтернативные рабочие тела с температурой кипения более низкой, чем у воды. Это открывает возможность организовать электрогенерацию, утилизируя при этом теплоту отборов. Применяв оборудование ОЦР

для данной ТТС, можно выработать 249 кВт электрической энергии, что в значительной мере обеспечит собственные нужды предприятия.

Освоение рассмотренных технических решений позволит повысить энергоэффективность производства строительного кирпича в исследованной системе.

Литература

1. Попов С.К., Стогов П.А. Теплотехнические расчеты туннельных печей. – М.: Издательский дом МЭИ, 2010.
2. Попов С.К., Ипполитов В.А. Решение задач высокотемпературной теплотехнологии в среде MathCAD: Учебное пособие. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009.

УДК 621.9.

А.А. АРБАТСКИЙ¹ к.т.н., ст. преподаватель
В.С. ГЛАЗОВ² к.т.н., доцент

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250 г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14
E-mail: arbatsky1985@mail.ru, mamurik@bk.ru

Влияние периодического обмерзания тепловых утилизаторов на эффективность работы

Аннотация: произведена оценка влияния периодического обмерзания тепловых утилизаторов с промежуточным теплоносителем на их совокупную энергетическую эффективность в системе вентиляции. Предложен способ борьбы с обмерзанием и разработана экспериментальная методика для построения математической модели роста ледяной «шубы» на теплообменниках.

Ключевые слова: тепловые утилизаторы, вентиляция и кондиционирование, обмерзание, конденсация, эффективность тепловой утилизации

A. A. ARBATSKIY PhD¹, V. S. GLAZOV, PhD²
National Research University «MPEI»,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st. 14
E-mail: arbatsky1985@mail.ru, mamurik@bk.ru

The effect of periodic freezing of the heat recovery systems

Abstract: was made approximate analysis of periodic freezing for heat recovery systems with intermediate thermal agent in hvac systems. Designed the method of struggle with freezing and elaborated of experimental method, which will allow make of numerical model of ice growth on surface of heat exchanger.

Key words: heat recovery, ventilation and air conditioning, freezing, condensation, effect of heat recovery

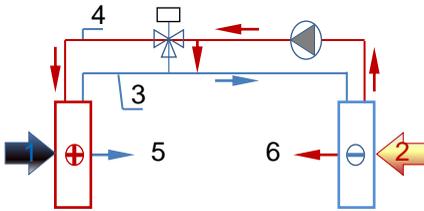


Рис. 1. Принципиальная схема системы тепловой утилизации с промежуточным теплоносителем: 1 – воздух с улицы, 2 – вытяжной воздух, 3 – «холодный» теплоноситель, 4 – «горячий» теплоноситель, 5 – нагретый воздух, 6 – охлажденный вытяжной воздух

Актуальность: На данный момент в системах вентиляции и кондиционирования зданий широко применяются различные системы тепловой утилизации, основанные на передаче тепла от вытяжного воздуха к приточному. Когда, из-за конструктивных особенностей здания и характера утилизируемых выбросов, невозможно применить ни роторные регенераторы, ни пластинчатые рекуператоры, применяются тепловые утилизаторы с промежуточным теплоносителем (рис.1). Данный тип тепловых утилизаторов характеризует наиболее низкая тепловая эффективность среди прочих методов экономии энергоресурсов в системах вентиляции. Связано это со следующими факторами:

1) Существенны потери при передаче тепла промежуточным теплоносителем (ПТ);

2) Оптимизация температурного графика ПТ выполняется путем выравнивания параметров рядности теплообменников на притоке и на вытяжке. Это, в большинстве случаев, приводит к отрицательным температурам ПТ и, как следствие, к периодическому обмерзанию теплообменника, находящегося на вытяжке. Особенно при высокой влажности вытяжного воздуха;

3) Эффективность всей системы зависит от эффективности калорифера как на приточной, так и на вытяжной системах. При этом выпадение конденсата на теплообменнике вытяжной системы способствует, с одной стороны, повышению эффективности, с другой при обмерзании, средняя по периоду эффективность существенно снижается, в то время как эффективность теплообменника на притоке, остается неизменной. Однако тепловой поток, передаваемый воздуху, теплообменником, на приточной части, существенно изменяется, за счет изменения температурного напора, при изменении температурного графика теплоносителя. На рис. 2 приведен примерный график изменения совокупной эффективности системы в течении времени (исходя из укрупненной оценки по уравнению (2)). Фактически данный график отображает эффективность системы от начала работы, до обмерзания (≈ 950 с).

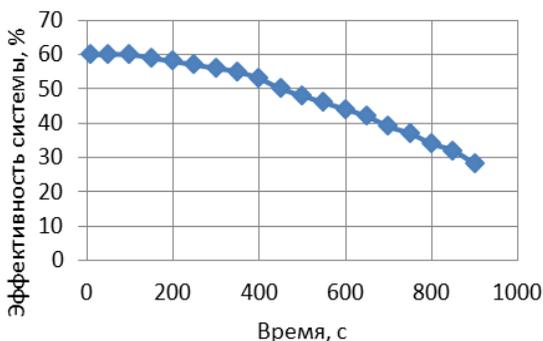


Рис. 2 График изменения эффективности системы рекуперации в течение времени работы

Основная цель исследования заключается в разработке эффективной системы борьбы с обмерзанием, для теплообменников влажного воздуха, и повышения эффективности систем тепловой утилизации.

В первую очередь данную систему необходимо разработать для систем тепловой утилизации с промежуточным теплоносителем, т.к. она, на данный момент, является наиболее низкоэффективной.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- Изучить механизм возникновения ледяной шубы на поверхностях теплообмена при взаимодействии с влажным воздухом;
- Определить инженерные методы борьбы с обмерзанием, для каждого типа теплообменного аппарата и проверить эффективность их работы;
- Разработать математическую модель роста ледяной шубы на поверхностях теплообмена, которая позволит варьировать ключевые параметры (геометрические и алгоритмические), определенных ранее, инженерных средств борьбы с обмерзанием;

Следует отметить, что попытка решения указанной выше проблемы представлена в работах [1] и [2]. Однако в работе [1] рассмотрены модели обледенения в области околосвуковых скоростей, и при поступлении жидкости на холодную поверхность из окружающей среды, в то время, как в нашем случае, конденсат будет образовываться непосредственно на теплообменной поверхности. Что касается работы [2], в ней не рассматриваются механизмы обледенения, а приведено только эмпирическое исследование с общими инженерными рекомендациями. В тепловых утилизаторах рассматриваемых систем, проблема решается исключительно методами контроля и автоматизации уже по факту образования значительного обледенения, что снижает эффективность данных систем в длительном периоде.

Решение поставленных задач

Для укрупненной, качественной оценки механизма возникновения ледяной «шубы» на поверхности теплообменника, использована классическая модель обтекания труб воздухом [3].

Предполагается, что обледенение в первую очередь происходит на следующих участках:

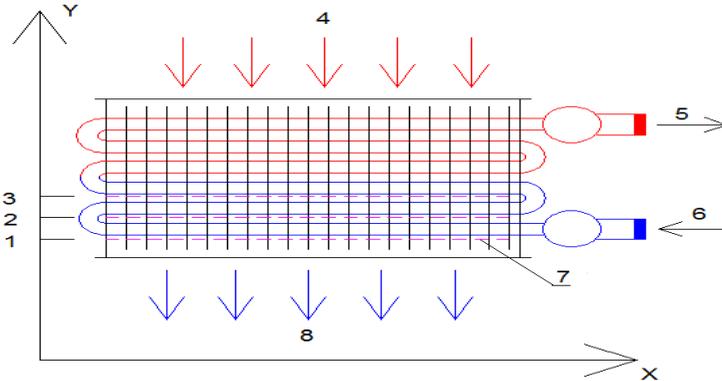


Рис. 4 Предположительные зоны роста обледенения: 4 – воздух из помещения; 5 и 6 – горячий и холодный теплоносители; 7 – предположительные зоны обледенения; 8 – вытяжной воздух после утилизатора

- С наибольшим расходом выпадающего конденсата;
- С наименьшей температурой теплоносителя;
- С наименьшей скоростью воздуха;

В подавляющем большинстве случаев используется противоточная схема движения теплоносителя, а т.к. за трубками образуются турбулентные вихри, существенно снижающие скорость потока воздуха, то рост ледяной «шубы» происходит на «задней» части трубок калорифера, в участках, обозначенных на рис.4.

Данный механизм впоследствии будет проверен экспериментально. Однако на данный момент, подобных качественных предположений достаточно, чтобы на основании базового энергетического уравнения (1) оценить величину потери тепло

вой мощности из-за периодического обмерзания в расчетном режиме

При этом следует понимать, что вероятность образования обледенения и скорость его роста не одинакова по всем обозначенным зонам и зависит от изначальной входной температуры холодного теплоносителя. Принимая во внимание оси, обозначенные на рис. 4, качественный график предположительной скорости роста обледенения, по участкам 1, 2 и 3 будет выглядеть так, как показано на рис. 5. Данный график составлен на основании:

- Общего энергетического уравнения (1);

- Экспоненциального закона распределения температуры теплоносителя в теплообменнике;

- Расчета процесса обработки воздуха в h - d диаграмме, который говорит о прогрессирующей скорости уменьшения абсолютного влагосодержания воздуха от последнего ряда, к первому (т.е. большая часть влаги конденсируется ближе к входу воздуха, при том, что к последним рядам теплообменника конденсация не прекращается);

- Данных экспериментального исследования [2], где говорится о том, что выпадение большого количества конденсата способствует уменьшению скорости роста обледенения (тоже следует и из уравнения (1));

$$Q_{скр} + Q_{внутр} + Q_{суб} + Q_{исп} + Q_{\lambda} + Q_{конв} + Q_{рад} = 0 \quad (1)$$

где: $Q_{скр}$ - скрытая теплота затвердевания, $Q_{внутр}$ - внутренняя теплота, $Q_{суб}$ - скрытая теплота сублимации, $Q_{исп}$ - скрытая теплота испарения, Q_{λ} - теплота передаваемая теплопроводностью, $Q_{конв}$ - теплота передаваемая конвекцией, $Q_{рад}$ - теплота передаваемая излучением;

Уравнение (1) практически полностью эквивалентно уравнению теплового баланса (10) приведенному в [1]. Исключены только составляющие связанные с теплотой кинетического нагрева и теплотой аэродинамического нагрева, т.к. в условиях нашей задачи мы имеем дело с малыми скоростями воздуха (до 10 м/с), и данные составляющие будут пренебрежимо малы.

Соответственно подставляя в данное уравнение, величины, принятые по укрупненным параметрам, мы можем вычислить величину свободной энергии, которая, при наличии отрицательной температуры поверхности охлаждения, пойдет на образование ледяной «корки», с погрешностью на возможное сдувание образующихся частиц льда.

Критическую толщину ледяной корки можно принять равной половине диаметра трубы, на основании традиционной компоновки подобных теплообменников. Таким образом, имеем:

$$\tau = mc_p t / Q \quad (2)$$

где: m – масса образованного льда; c_p – удельная теплоемкость льда; t – температура льда; Q – количество свободной энергии (1);

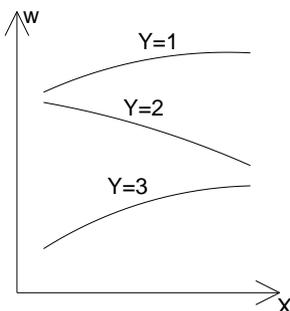


Рис. 5. Качественный график скорости роста ледяной «корки»

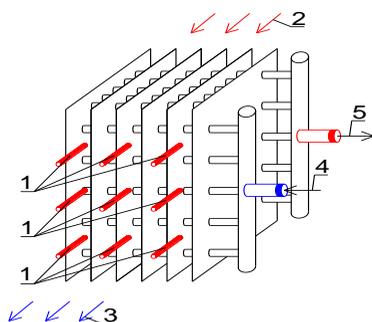


Рис. 6. Система контроля поверхности теплообменника 1 – датчики контроля поверхности, 2 – вытяжной воздух, 3 – воздух после тепловой утилизации, 4 – «холодный» теплоноситель, 5 – «горячий» теплоноситель

датчиков, установленных в местах роста ледяной шубы, осуществление тонкой регулировки подмешивания холодного теплоносителя на теплообменник вытяжной системы рис. 1;

На сегодняшний день с целью фиксирования образования ледяной шубы на теплообменниках, применяются дифференциальные датчики давления, которые срабатывают, когда уже есть значительные потери давления, за счет образования ледяной «шубы» на 40-50% поверхности теплообмена.

Основное отличие от существующих на сегодняшний день методов борьбы с обмерзанием утилизаторов такого типа, является именно тонкая регулировка, которую можно осуществить, зафиксировав обмерзание на самой ранней стадии, при этом не снизив тепловую мощность теплообменника более чем на 5%, фактически сохранив постоянную эффективность системы

Соответственно для получения реальной математической модели роста обледенения теплообменника, и как следствие разработки алгоритма работы системы, необходимо создание экспериментальной установки, принципиальная схема которой представлена на рис. 7.

Полученный примерный график с обозначением периодов замерзания-оттайки (рис. 2), позволяет обосновать актуальность нашей работы.

Исходя из всех приведенных выше соображений, можно предложить следующую совокупность инженерных методов борьбы с обмерзанием:

- Размещение на поверхности теплообменника датчиков, контроля возникновения ледяной шубы (предположительно датчики температуры) рис. 6;

- По сигналам данных

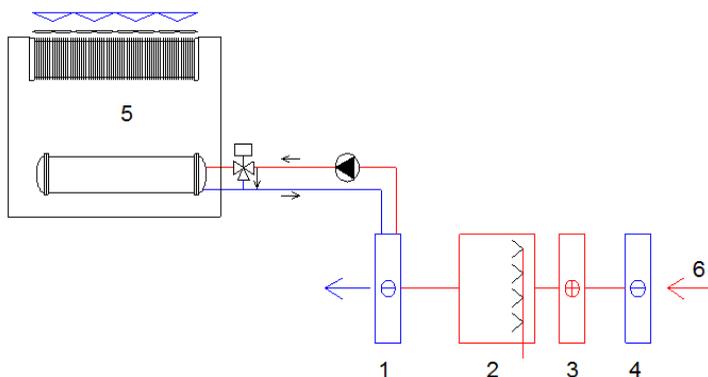


Рис. 7. Экспериментальная установка для исследования процессов обмерзания теплообменников систем вентиляции: 1 – исследуемый теплообменник, 2 - пароувлажнитель, 3 – нагреватель, 4 - охладитель, 5 – холодильная машина

Данная экспериментальная установка, позволит визуализировать механизм роста обледенения на поверхности теплообмена, при разной температуре теплоносителя. Наблюдение за процессом обледенения при разной температуре и влажности воздуха, позволит создать универсальный алгоритм, либо серию алгоритмов, действующих в определенном диапазоне параметров, для обеспечения работы предложенной системы. Соответственно для каждой конструкции теплообменных аппаратов могут быть решены все три поставленные задачи, и опробован, как предложенный инженерный метод борьбы с обледенением, так и предложены иные методы по результатам проведения испытаний.

Заключение

В рамках данной работы, произведена предварительная оценка механизма возникновения ледяной шубы для систем тепловой утилизации с промежуточным теплоносителем, и предложен инженерный метод борьбы с данным явлением. Разработана принципиальная схема экспериментальной установки, для последовательного и точного решения поставленных задач, для тепловых утилизаторов с промежуточным теплоносителем.

Литература

1. **С.В. Алексеенко**, А.А. Приходько Численное моделирование обледенения цилиндра и профиля, обзор моделей и результаты расчетов – «Ученые записки ЦАГИ» №6, Днепропетровский национальный университет, 2013 г.
2. **Noval**, Условия эффективной работы пластинчатых теплообменников (рекуператоров) в суровых климатических условиях – «Технический бюллетень» №9, 2009 г.
3. **Исаченко В.П.**, Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. - М.: Энергия, 1975 г.

УДК 536.2

Э.А. ГАБДРАХМАНОВ¹ студент,
В.С. ГЛАЗОВ² к.т.н., доцент

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250 г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14
E-mail: gabemal@mail.ru¹, mamurik@bk.ru²

Совершенствование метода расчета компактного теплообменника

Аннотация: представлена методика расчета оребренных теплообменных аппаратов, основанная на оптимизации параметров одиночного ребра.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, ребро, оптимизационная задача, методика расчета.

E.A. GABDRAKHMANOV student¹,
V.S. GLAZOV, PhD²

National Research University «MPEI»
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st. 14
E-mail: gabemal@mail.ru¹, mamurik@bk.ru²

Improvement of the method of calculation of a compact heat exchanger

Abstract: the method of calculating is presented finned heat exchangers based on optimization of parameters of a single fin

Key words: heat exchanger, fin, optimization task, calculation method

Введение. В настоящее время сложилась непростая ситуация на рынке энергоресурсов. Темпы роста добычи топлива снизились, а то и вовсе сменились спадом. Это вынуждает правительство многих стран проводить политику энергосбережения, которая способствует проведению новых исследований и разработкам в данном направлении.

Опыт показывает, что интенсификация процессов теплообмена способствует уменьшению необходимой площади поверхности теплообмена, габаритных размеров аппаратов и их металлоемкости. В результате сокращаются затраты на производство, эксплуатацию и ремонт аппаратов, т.е. снижаются приведенные затраты на обеспечение необходимомо процесса.

Оребрение теплообменников как инструмент повышения эффективности аппаратов используют очень давно. Однако вопрос оптимизации ребер рассматривался не так часто. В частности, Ройзен Л.И. рассматривал оптимизацию оребренных поверхностей, но его исследования затрагивали ребра, перпендикулярно ориентированные к поверхности теплообмена, и не имели ограничения по толщине. На практике же встречаются ребра, расположенные под углом к поверхности. Используя работу [1] можно заметить, что оптимизация прямых ребер приво-

дит к тому, что высота ребра увеличивается, а толщина уменьшается, что влечет за собой увеличение габаритов аппаратов, уменьшение скорости теплоносителей и прочностных характеристик аппарата. Для снятия данных проблем можно использовать ребра треугольного профиля. Увеличение высоты ребра и подбор угла его наклона способствует получению более выгодных параметров теплообменного аппарата (ТА).

Постановка и решение задачи. Целью данного исследования является сопоставление теплотехнических параметров существующих аппаратов, имеющих конфигурации ребер из стандартного ряда [2], с теплообменниками, поверхности которых имеют ребра, обеспечивающие максимальную теплоотдачу при заданной массе и компактности аппарата.

Методика конструктивного расчета существующих оребренных теплообменников заключается в следующих этапах: 1) задание габаритов аппарата; 2) расчет проходных сечений и теплообменной поверхности; 3) расчет скоростей теплоносителей; 4) расчет ТФС и коэффициентов теплоотдачи; 5) расчет коэффициента теплопередачи и расчет теплообменной поверхности через уравнение теплопередачи.

Отличие данного исследования заключается в добавлении в существующую методику зависимости, позволяющую найти высоту ребра, соответствующей максимальному тепловому потоку, передаваемому ребром постоянной массы.

В задаче рассмотрены 4 варианта пластинчатого оребренного рекуператора одинаковой массы. Аппараты имеют гладкие прямоугольные ребра треугольного профиля. Теплоносителями обоих сред является воздух. Основное различие в теплообменниках – использование ребер различной конфигурации: «Стандартные» ребра [2]; ребра имеют оптимальную высоту; ребра имеют оптимальную высоту, шаг в два раза меньше, чем в 1-ом пункте; ребра имеют оптимальную высоту, шаг в полтора раза больше, чем в 1-ом пункте.

В табл. 1 представлены исходные данные для расчета теплообменника с ребрами из стандартного ряда [2]. Результаты расчетов различных вариантов ТА сведены в табл. 2.

Анализ результатов. Согласно данным табл. 2 оптимизация ребра приводит к увеличению мощности теплообменного аппарата и, следовательно, к увеличению его эффективности. Изменением частоты расположения ребер можно улучшить конкретные показатели рекуператора. Так, уменьшая шаг ребер и оптимизируя их высоту, можно получить теплообменник с меньшими габаритами. С увеличением шага ребер снижается компактность аппарата, а также мощность на прокачку теплоносителей. Поскольку оптимизация ребер приводит к их утончению, необходимо ввести ограничение на их толщину, тем самым обеспечив необходимую жёсткость конструкции ТА. Из табл. 2 видно, что с ростом тепловой мощности ТА и одновременном снижении гидравлических

потерь резко возрастает критерий Кирпичева. Кроме того, стандартный ТА, соответствующий 1-ой конфигурации, имеет потенциал для повышения его эффективности.

Таблица 1. Исходные данные

Наименование	Обозначение	Значение
Температура горячего теплоносителя на входе, °С	t_h	26
Температура холодного теплоносителя на входе, °С	t_c	10
Температура холодного теплоносителя на выходе, °С	t'_c	18
Расход горячего и холодного теплоносителей, кг/с	G	0,3
Шаг ребер, мм	a	4,6
Толщина ребер, мм	δ	0,15
Длины трактов обоих теплоносителей, м	L	0,52
Расстояние между пластинами, мм	b	7
Коэффициент теплопроводности ребра, Вт/(м·К)	λ	47

Таблица 2. Сравнение параметров ТА

Параметры	Конфигурация			
	1	2	3	4
Мощность ТА Q , кВт	2,4	3,7	2,5	4,3
Коэффициент теплопередачи k , Вт/(м ² ·К)	7,34	4,29	7,34	2,71
Поверхность теплообмена F , м ²	42,3	121,3	47,9	219,6
Объем ТА $V_{ТА}$, м ³	0,137	0,515	0,109	1,337
Высота ребра h , мм	4,1	14,3	11,8	16,8
Шаг ребра a , мм	4,6	4,6	2,3	6,9
Расстояние между пластинами b , мм	7,0	28,3	23,5	33,0
Толщина ребра δ , мм	0,15	0,04	0,05	0,04
Эффективность ТА ε	0,500	0,608	0,512	0,640
Гидравлическое сопротивление ΔP , Па	132,2	4,8	42,1	1,3
Критерий Кирпичева E_k	30,0	1301,1	100,2	5461,5

Заключение. Разработана методика расчета компактного ТА, основанная на определении оптимальных параметров прямоугольного ребра, соответствующих максимальному тепловому потоку, передаваемому ребром постоянной массы.

Литература

1. **Оптимизация** и эффективность интенсификаторов теплообмена / Г.Н. Афонина, Э.А. Габдрахманов, В.С. Глазов, М.М. Идрисов // Энергосбережение —

теория и практика: Труды Восьмой Международной школы-семинара молодых ученых и специалистов. (Москва, 10–13 октября 2016 г.) – М.: Издательский дом МЭИ, 2016. С. 9-14.

2. **Воронин Г.И.** Конструирование машин и агрегатов систем кондиционирования: Учебник для авиационных специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1978, – 544 с.

УДК 624;69;72

П.С. КЛЕЙМЕНОВА ¹, В.А. КРУГЛОВА ² студентки,
М.В. ГОРЕЛОВ, к.т.н., доц.

Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»
111250 Россия г.Москва, ул. Красноказарменная 14
E-mail: polinakleymenova@mail.ru¹, vasilisa_kr6@mail.ru²

Применение систем навесных вентилируемых фасадов в различных климатических условиях России

Аннотация: Проведено исследование вентилируемых фасадов с целью установить влияние зависимости фактора диффузионного переноса водяного пара на тепловлажностные свойства ограждающих конструкций в трех климатической зонах России.

Ключевые слова: тепловая защита зданий, фасад здания, вентилируемый зазор, паропроницаемость, климат.

P.S. КЛЕЙМЕНОВА ¹, V.A. KRUGLOVA ² students,
M.V. GORELOV, Associate Professor
National Research University Moscow Power Engineering Institute
11250, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14
E-mail: polinakleymenova@mail.ru¹, vasilisa_kr6@mail.ru²

Application of systems of hinged ventilated facades in different climatic conditions of Russia

Abstract: A study of ventilated facades has been carried out to determine the effect of the dependence of the diffusion transfer of water vapor on the thermal and moisture properties of the enclosing structures in the three climatic zones of Russia.

Key words: Thermal protection of buildings, building's facade, vented gap, Vapor permeability, climate.

Ежегодно возрастающие строительные нормы для зданий привели к тому, что явилось множество конструктивных решений для отделки фасадов домов, появились новые методы монтажа облицовки фасадов. Один из них – навесные вентилируемые фасады, которые впервые стали использоваться в Финляндии и Германии. В нашей стране особое распространение они получили только за последние 8-10 лет. На сегодняшний день в России насчитывается около 15 крупных заводов изго-

товителей различных подсистем из стали и алюминия и более 50 крупных отечественных производителей облицовочных материалов.

Главное отличие вентилируемого фасада от других типов фасадных систем - это наличие конструкционного зазора между облицовкой и несущей стеной. Наличие вентилируемой воздушной прослойки способно существенно улучшить влажностное состояние слоя теплоизоляции. Зона конденсации сдвигается в наружный теплоизоляционный слой, который граничит с вентилируемой воздушной прослойкой. Расположение теплоизоляции снаружи способствует увеличению теплоаккумулирующей способности массива стены.



Рис. 1. Конструкция навесного вентилируемого фасада

Конструкция стены данной системы позволяет вынести «точку росы» за пределы несущей стены здания, что предотвращает переувлажнение ограждающей конструкции. Это переувлажнение может возникнуть благодаря следующим причинам: атмосферные осадки, строительная влажность, диффузионный перенос водяного пара из более теплой толщи конструкции к наружному слою [1]. В данной работе исследовано влияние последнего фактора на тепловлажностные свойства ограждающих конструкций в трех климатических зонах России на примере навесных вентилируемых фасадов [2]. Для сравнения был произведен расчет конструкции навесного скрепленного фасада, который по данным Европейской Ассоциации систем теплоизоляции штукатурного типа оказались несостоятельны в условиях обычной европейской зимы. В таблице представлен показатель, называемый требуемым сопротивлением паропроницанию из условия ограничения влаги в наружной стеновой панели за период с отрицательными температурами сопротивления воздуха, который является одним из основных показателей паропроницаемости ограждающей конструкции. Расчет произведен по [3] и [4].

Таблица 1. Значения требуемого сопротивления паропроницанию $R_{п2тр}$ из условия ограничения влаги в ограждающей конструкции в период с отрицательными среднемесячными температурами, ч · Па/мг

	Барнаул (сухая зона влажности)		Москва (нормальная зона влажности)		Петропавловск-Камчатский (влажная зона влажности)	
	Треб.	Факт.	Треб.	Факт.	Треб.	Факт.
Навесной вентилируемый фасад	3,47	5,34	2,62	5,34	2,08	5,36
Мокрый фасад	1,18	8,97	1,38	9,46	1,73	11,30

При этом фактические значения паропроницаемости оказались значительно выше требуемых. Второй основной показатель - требуемое сопротивление паропроницанию из условия недопустимости накопления влаги за год эксплуатации был значительно меньше этих параметров, поэтому не оказывал значительного влияния. Таким образом, мы можем сделать вывод, что влияние такого параметра как диффузия пара из воздуха в помещении в наружный воздух, часто переоценивается, и в рассмотренных случаях оно не составляет проблемы.

Литература

1. Гагарин В.Г. Теплоизоляционные фасады с тонким штукатурным слоем // Журнал «АВОК», 2007, №6, с. 82-104.
2. Машенков А.Н., Е.В. Чебурканова. Методические указания к курсовой работе по курсу «Строительная теплофизика» для студентов дневного и заочного факультетов специальности «Теплогазоснабжение и вентиляция» и «Промышленная теплоэнергетика», Н.Новгород, 2005, 32 с.
3. СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003.
4. СП 131.13330.2012 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*.

УДК 621.565.93/95

МХОЯН А. А.¹, студент, КИРДЯШКИН А. В.², студент,
ГЛАЗОВ В. С., к.т.н., доцент

Московский Энергетический Институт
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная 17
E-mail: anuta.mkhoyan@gmail.com, sashakir2009@yandex.ru

Методика расчета пластинчатого теплообменника с П-образными ребрами

Аннотация. Рассмотрена возможность повышения эффективности пластинчатого-ребристого теплообменника за счет оптимизации его ребер.

Ключевые слова: оптимизация ребер, компактный теплообменник

A.A. MKHOYAN, student, A.V. KIRDYASHKIN, student,
V.S. GLAZOV, PhD

Moscow Power Engineering Institute,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st, 17

E-mail: anuta.mkhoyan@gmail.com, sashakir2009@yandex.ru

Calculation method of a plate-fin heat exchanger with rectangular fins

Abstract. Improving the efficiency of the heat exchanger through optimization of its fins.

Key words: optimization of fin, compact heat exchangers

Введение. Один из способов увеличения эффективности теплообменного аппарата (ТА) связан с применением поверхностных интенсификаторов теплообмена (ребра, гофры, лунки и т.д.). В работе [1] представлено решение задачи по определению параметров прямоугольного ребра с теплоизолированным торцом, обеспечивающих максимальный тепловой поток при заданной массе ребра. Однако в данной работе отсутствуют учет ограничений на толщину ребра, которая обеспечивает необходимую прочность ТА. Кроме того, среди рассмотренных методов расчета пластинчатого ТА существуют противоречия и неточности в определении эквивалентного диаметра [2, 3], а также коэффициента компактности аппарата, который без иллюстраций, уточняющих его словесное определение, не может пониматься однозначно [4, 5].

Для снятия указанных проблем были решены следующие задачи:

1. Определение оптимальных параметров прямоугольного ребра при заданной его материалоемкости и ограничении на толщину, обеспечивающей необходимую жесткость конструкции ТА.

2. Ввести в методику расчета пластинчатого ТА, наличие связи между параметрами прямоугольных ребер и максимальной теплоотдачей при фиксированной массе ребер и заданного диапазона их толщин.

3. Определить потенциал возможного повышения эффективности теплообменника [6] с помощью усовершенствованной методики.

Решение. При решении указанных задач использован материал работы [6], в которой был применен фактор Колборна (1), и результаты расчета подкреплены экспериментально.

$$j = 0.53 \cdot \text{Re}^{-0.5} \cdot \left(\frac{l}{D_{\text{экв}}} \right)^{-0.15} \cdot \alpha^{-0.14} \quad (1)$$

Процедура решения 1-ой задачи отличается от решения, представленного в работе [1] (см. [7]). Результат этого решения представлен на рис. 1. Из данного графика мы можем видеть, что, во-первых, при увеличении коэффициента теплоотдачи максимальный тепловой поток увеличивается, а оптимальная высота уменьшается. Во-вторых, огра-

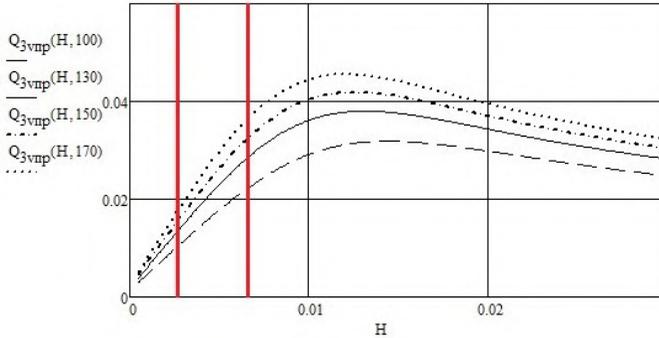


Рис. 1. Зависимость теплового потока от коэффициента теплоотдачи и высоты ребра с теплоизолированным торцом

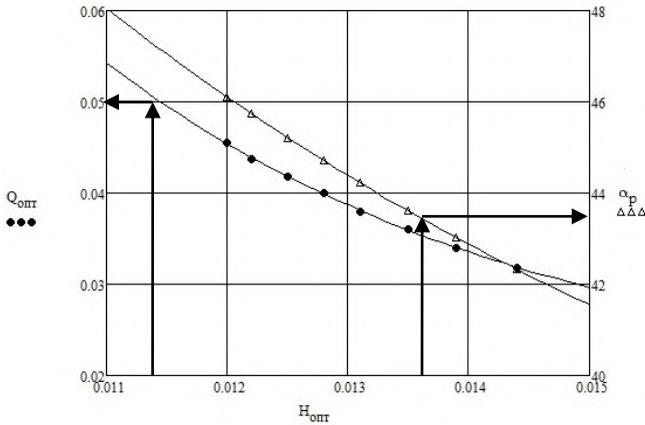


Рис. 2. Определение оптимального теплового потока и коэффициента теплоотдачи, в зависимости от оптимальной высоты и шага ребер

нение на толщину ребра может привести к варианту, когда максимум теплового потока попадает на границу её допустимого значения.

На рис. 2 представлена графическая иллюстрация результата решения 2-ой задачи, когда параметры ребра являются оптимальными и коэффициент теплоотдачи определен с учетом их размеров и частоты расположения ребер в каналах теплообменника. Данный график позволяет определить максимальный поток и коэффициент теплоотдачи по заданной высоте и шагу (частоте) расположения ребер.

Результаты решения 3-й задачи приведены на рис. 3 и табл. 1. Рис. 3 отличается от рис. 2 тем, что параметры ребра не соответствуют

оптимальным значениям, но входят в интервал допустимых значений. В

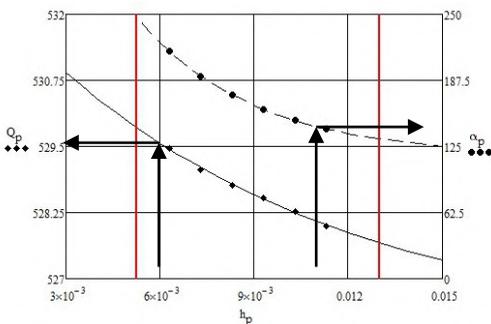


Рис. 3. Зависимость теплового потока и коэффициента теплоотдачи от высоты ребра

табл. 1 представлены результаты расчета ТА до и после оптимизации.

До – соответствует методике [6], а после – методике, в которой высота канала задается не в исходных данных, а определяется по высоте теплоизолированного с торца ребра, которая ближе к оптимальной, чем высота, указанная в

работе [6]. Кроме того, коэффициент теплоотдачи находится по этой высоте ребра и частоте его расположения в горячем канале ТА.

Таблица 1. Результаты расчета пластинчатого ТА

Наименование величин	До оптимизации	После оптимизации	%
Высота ребра, мм	9.3	6.3	32.3
Межреберное расстояние, мм	1.501	1.412	6
Тепловой поток, Вт	528.5	529.5	0.2
Эффективность	0.94	0.942	0.2
Коэффициент компактности	247500	246500	0.4

Заключение. Уменьшение высоты ребер только по горячей стороне привело к заметному увеличению коэффициента теплоотдачи и к незначительному росту эффективности теплообменника. Данный эффект обусловлен тем, что в рассматриваемой зоне высота ребер превышает их оптимальные значения (см. рис.1).

Литература

1. Ройзен Л.И., Дулькин И.Н. Тепловой расчет ребренных поверхностей. – М.: Энергия. 1977. – 256 с.
2. Бородин А.А., Портнов В.Д., Сасин В.Я., Федоров В.Н. Расчет теплообменных аппаратов. – М.: МЭИ. 1996. – 52 с.
3. Воронин Г.И. Конструирование машин и агрегатов систем кондиционирования: Учебник для авиационных специальностей вузов. – М.: Машиностроение. 1978. – 544 с.
4. Кейс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. – М.: Энергия.1967. – 224 с.
5. Чичиндаев А.В. Оптимизация компактных пластинчато-ребристых теплообменников. Часть 1. Теоретические основы: Учебное пособие. – Новосибирск: НГТУ. 2003. – 400 с.

6. **Akash Pandey** Performance analysis of a compact heat exchangers. Master of technology thesis in mechanical engineering. – Rourkela: National institute of technology. 2011.

7. **Оптимизация** ребер разной формы /А.А. Мхойн, А.В. Кирдяшкин, В.С. Глазов // Радиозлектроника, электротехника и энергетика: Двадцать третья Междунар. Науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (2-3 марта 2017 г., Москва): Тез. Докл. В 3 т. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2017. – С. 296-297.

УДК 536.244

Д.А. ОНОХИН¹, аспирант,
Э.Н. САБУРОВ², д.т.н., профессор

Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
163002, г. Архангельск, наб. Северной Двины, 17
E-mail: onokhin-arh@yandex.ru¹, saburov@narfu.ru²

Исследование конвективного теплообмена в циклонной камере

Аннотация. Проанализированы результаты исследования конвективного теплообмена на боковой поверхности рабочего объема циклонной камеры методом парового калориметрирования и при помощи датчиков теплового потока, полученные расчетные уравнения теплоотдачи.

Ключевые слова: циклонная камера, конвективный теплообмен, уравнение теплоотдачи, датчик теплового потока.

D.A. ONOKHIN, postgraduate student,
E.N. SABUROV, Doctor of Engineering, professor

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
163002, Arkhangelsk, Severnoy Dviny Emb., 17
E-mail: onokhin-arh@yandex.ru¹, saburov@narfu.ru²

Research of convective heat transfer in cyclone chamber

Abstract. Analyzed results of the study of convective heat exchange on the side of the working volume of the vortex chamber with help the steam calorimetry method and the method of using thermal flow sensors, obtained heat transfer equations.

Keywords: cyclone chamber, convective heat transfer, heat transfer equation, thermal flow sensor.

В работе рассмотрены результаты исследования теплоотдачи на боковой поверхности рабочего объема циклонной камеры большой относительной длины. Поскольку циклонные камеры имеют широкое распространение в промышленности в качестве печей, топков и других устройств различного технологического назначения [1–2], рассматриваемая задача представляет большой практический интерес.

Исследование проводили двумя методами: парового калориметрирования – конденсации слегка перегретого (на 2–3°C) водяного пара,

подаваемого в калориметр и использования градиентных датчиков теплового потока [3] на экспериментальном стенде (рис. 1), основным элементом которой являлась секционированная циклонная камера, диаметром рабочего объема $D_k = 160$ мм. Относительная длина камеры $L_k = L_k/D_k = 12,75$. Подвод воздуха в закручиватель камеры осуществляли тангенциально с диаметрально противоположных сторон двумя входными каналами (шлицами). Оси шлицев находились в одной поперечной плоскости на расстоянии $0,5D_k$ от глухого торца закручивателя. Безразмерную площадь поперечного сечения входных каналов (площадь входа потока) $f_{вх} = 4f_{вх}/\pi(D_k)^2$ изменяли специально спрофилированными вкладышами. Относительный диаметр выходного отверстия камеры $d_{вых} = d_{вых}/D_k$ изменяли сменными диафрагмами.

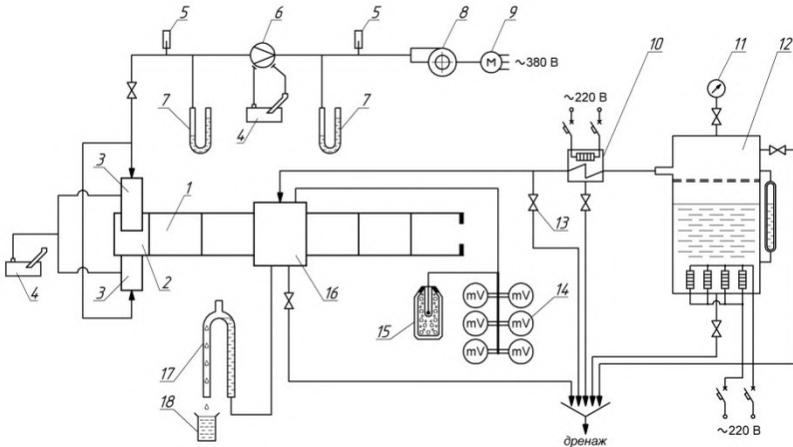


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – циклонная камера; 2 – закручиватель; 3 – входные каналы (шлицы); 4 – микроманометры; 5 – термометры; 6 – сужающее устройство; 7 – U-образные манометры; 8 – воздуходувка; 9 – приводной двигатель; 10 – пароперегреватель; 11 – манометр; 12 – паровой электродвигатель; 13 – вентиль; 14 – потенциометры; 15 – сосуд с тающим льдом; 16 – калориметр; 17 – гидрозатвор; 18 – сосуд для сбора конденсата

Внутренний диаметр калориметра равен диаметру рабочего объема циклонной камеры. Длина рабочего участка калориметра составляла 80 мм. Секционированная конструкция циклонной камеры позволяла менять расположение калориметра по ее длине. Продольную координату $z = z/D_k$, определяющую местоположение среднего сечения калориметра, отсчитывали от глухого торца закручивателя вдоль оси рабочего объема камеры.

На внутренней поверхности калориметра при помощи высокотеплопроводного термокля установлены три датчика теплового потока

(рис. 2) фирмы Captec размерами 2,5×10 мм и 5×10 мм. Толщина датчиков составляла 0,5 мм.

Снаружи и с торцов калориметр был теплоизолирован. Температуру рабочей поверхности калориметра принимали равной температуре насыщенного пара. Общее количество теплоты, проходящее через боковую поверхность рабочей секции калориметра, определяли по массе конденсата, собранного в специальный сосуд, весовым способом с точностью до 0,01 г. Поддержание требуемых значений избыточного давления и перегрева при изменении расхода воздуха осуществляли нагревательными элементами котла и пароперегревателя. Контроль за температурой перегретого пара производили медь-константановой термопарой, установленной на паропроводе у входа в калориметр.

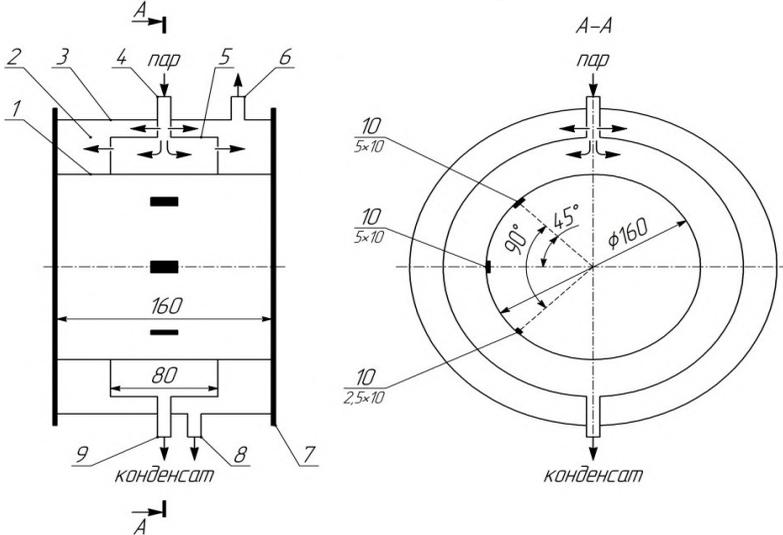


Рис. 2. Схема калориметра и установки датчиков: 1 – внутренняя цилиндрическая стенка, 2 – охранный участок, 3 – наружная цилиндрическая стенка, 4 – штуцер подвода пара, 5 – рабочий участок, 6 – продувочный штуцер, 7 – фланец крепления калориметра к камере, 8 – штуцер отвода конденсата в дренаж, 9 – штуцер отвода конденсата на измерение; 10 – датчики теплового потока.

В опытах варьировали параметры $\bar{t}_{вх}$ от 0,02 до 0,21; $\bar{d}_{вых}$ от 0,2 до 1; \bar{z} от 1,75 до 12,25. Измерения проводили при 5–6 значениях входного числа Рейнольдса $Re_{вх} = u_{вх} D_k / \nu_{вх}$, где $u_{вх}$ – скорость потока на входе в камеру (в шлицах), $\nu_{вх}$ – кинематический коэффициент вязкости потока в шлицах. Всего выполнено около 300 опытов.

Обобщение полученных данных производили в форме уравнения подобия:

$$Nu = A Re_{\text{вх}}^n \varepsilon_r \varepsilon_z, \quad (1)$$

где $Nu = \alpha D_k / \lambda_{\text{вх}}$ – местное число Нуссельта; α – местный (по условиям опытов) коэффициент теплоотдачи; $\lambda_{\text{вх}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха; ε_r – сомножитель, учитывающий влияние относительных геометрических характеристик камеры; ε_z – сомножитель, учитывающий изменение числа Nu вдоль рабочего объема камеры; A – коэффициент пропорциональности.

При большой относительной длине рабочего объема камеры условия вывода газов (диаметр выходного отверстия) практически не оказывают влияния на теплоотдачу на боковой поверхности камеры. В этом случае определяющее влияние имеют условия ввода потока (площадь входа). Установлено, что:

$$\varepsilon_r = \bar{f}_{\text{вх}}^{0,4}. \quad (2)$$

Локальные коэффициенты теплоотдачи на боковой поверхности циклонной камеры убывают по мере продвижения потока к выходному отверстию (с увеличением продольной координаты z). Таким образом, сомножитель ε_z имеет вид:

$$\varepsilon_z = \bar{z}^{-0,163 \bar{f}_{\text{вх}}^{0,23}}. \quad (3)$$

Обобщение данных, полученных методом калориметрирования, позволило получить зависимость:

$$Nu = 0,188 Re_{\text{вх}}^{0,75} \bar{f}_{\text{вх}}^{0,4} \bar{z}^{-0,163 \bar{f}_{\text{вх}}^{0,23}}. \quad (4)$$

Обобщение данных, полученных с использованием датчиков теплового потока, выполненное аналогичным способом, дало следующее уравнение:

$$Nu = 0,237 Re_{\text{вх}}^{0,73} \bar{f}_{\text{вх}}^{0,4} \bar{z}^{-0,33 \bar{f}_{\text{вх}}^{0,12}}. \quad (5)$$

Уравнения (4), (5) применимы в диапазоне $Re_{\text{вх}} = (0,4 \dots 5,98) \cdot 10^5$. Отклонение опытных данных от обобщенных зависимостей (4), (5) не превышает $\pm 10\%$.

В работе наблюдалась хорошая повторяемость результатов измерений. Данные, полученные датчиками, подтверждают, что основное влияние на теплоотдачу оказывают условия ввода потока.

Близкое совпадение данных, полученных двумя методами, позволяют сделать заключение – градиентные датчики теплового потока могут успешно применяться для исследования конвективного теплообмена в циклонных камерах.

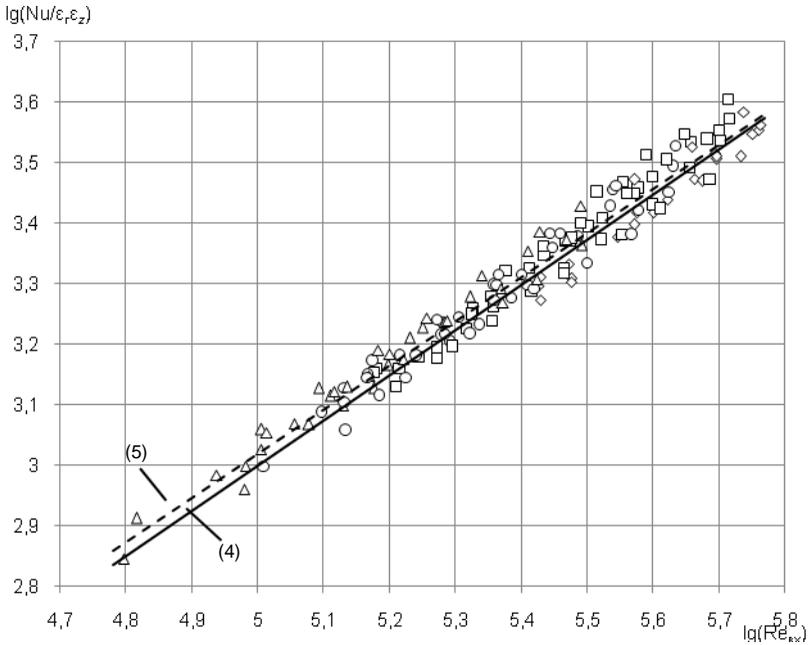


Рис. 3. Опытные данные, полученные датчиками; сравнение уравнений (4) и (5).
 Обозначения: $f_{ex} = 0,02$ – \diamond ; $0,04$ – \square ; $0,08$ – \circ ; $0,12$ – Δ ; $0,21$ – \times .

Литература

1. **Сабуров Э.Н.** Циклонные нагревательные устройства с интенсифицированным конвективным теплообменом. – Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во, 1995. – 341 с.
2. **Циклонные** устройства в деревообрабатывающем и целлюлозно-бумажном производстве / Э.Н. Сабуров, С.В. Карпов. – М.: Экология, 1993. – 368 с.
3. **Градиентные** датчики теплового потока / С.З. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. – 168 с.

УДК 536.24

А.А. МАЗЛОВ¹, студент, Н.А. ЕЛФИМОВ², студент,
Г.С. ЗАКОЖУРНИКОВА³, к.т.н., ст. преподаватель,
С.С. ЗАКОЖУРНИКОВ⁴, к.т.н

ФГБОУВО «Волгоградский государственный технический университет»
400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, д. 28.
E-mail: mazloff.andrej@yandex.ru¹, vaio131@ya.ru², galya.vlz@mail.ru³, jes-
ter.vlz@mail.ru⁴

Влияние фильтрационного переноса на изменение температуры в реакционной зоне печи сопротивления для получения карбида кремния

Аннотация. Рассматриваются процессы тепломассопереноса при производстве карбида кремния (SiC) в печах сопротивления. Проанализировано влияние фильтрационной составляющей.

Ключевые слова: производство карбида кремния, математическая модель, фильтрация, тепломассоперенос.

A.A. MAZLOV, student, N.A. YELFIMOV², student,
G.S. ZAKOZHURNIKOVA³, Candidate of Engineering, Senior Lecturer,
S.S. ZAKOZHURNIKOV⁴, Candidate of Engineering

Volgograd State Technical University, Russia
400005, Volgograd, the prospect of V.I. Lenina, 28.
E-mail: mazloff.andrej@yandex.ru¹, vaio131@ya.ru², galya.vlz@mail.ru³,
jester.vlz@mail.ru⁴

The filtration transfer effect on the temperature change in the reaction zone of the resistance furnace for the production of silicon carbide

Abstract. The processes of heat and mass transfer in the production of silicon carbide (SiC) in resistance furnaces are considered. The influence of the filtration component is analyzed.

Keywords: production of silicon carbide, mathematical model, filtration, heat and mass transfer.

На сегодняшний день спрос на карбид кремния (SiC) возрастает. Использование SiC увеличивается в атомной промышленности, авиационной, космической и военной [1]. Поэтому вопрос получения карбида кремния является одним из наиболее актуальных и перспективных.

Получения SiC в печах сопротивления представляет собой сложный процесс, включающий в себя тепломассоперенос и химические реакции при внутреннем нагреве. Важным в рассматриваемой задаче являются: получение оптимального выхода продукции, сокращение времени про-

цесса производства, что приведет к экономии энергоресурсов и улучшению экологического состояния региона.

В [2] построена комплексная математическая модель, включающая следующие взаимосвязанные процессы: нестационарный процесс теплопроводности, сушку, распределение давления газов в шихте и фильтрацию газа, подвод тепла за счет внутреннего нагрева ядра электрическим током, теплоту химических реакций.

Модель позволяет построить алгоритм расчета температурных полей с учетом основных факторов, влияющих на интенсивность процессов теплообмена в электропечах сопротивления, перечисленных выше.

Рассмотрим влияние фильтрационного переноса на температурные кривые. Перетоки газа образующиеся в процессе производства SiC определяются фильтрационным движением, то есть распределением давления в газовом пространстве системы [3.4].

По результатам расчетов авторами получена зависимость температуры от времени (рис.1) и показано влияние фильтрационного переноса на изменение температур в разных зонах печи.

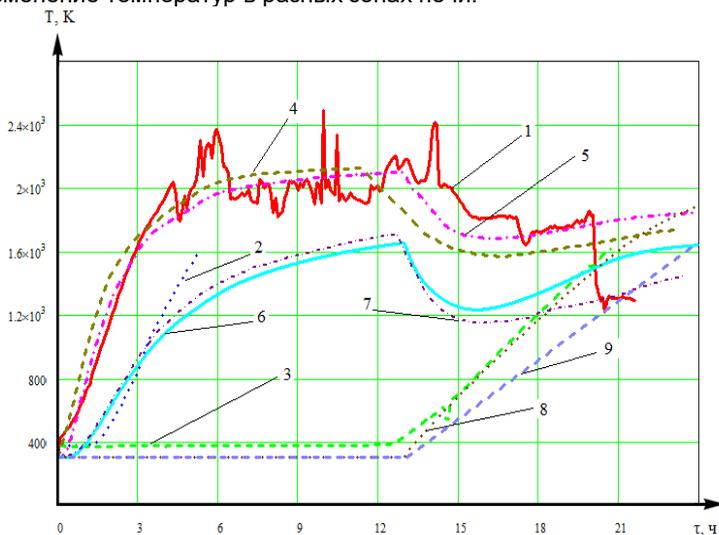


Рис. 1 – Графики температур для карбида кремния черного с учетом фильтрационного переноса и без его учета:

- 1, 2, 3 – кривые, построенные по экспериментальным данным [2];
- 5, 6, 8 – кривые, соответствующие кривым 1, 2, 3, построенные по результатам численных экспериментов с учетом фильтрационного переноса;
- 4, 7, 9 – кривые, соответствующие кривым 5, 6, 8, построенные по результатам численных экспериментов без учета фильтрационного переноса

В связи с тем, что газообразные фильтрационные потоки не могут переносить значительное количество тепла, влияние фильтрации в зоне, прилегающей к керну, незначительно (кривая 4 в сравнении с кривой 5). Однако темп роста температуры в удаленной от керна зоне заметно зависит от горячих фильтрационных потоков, в основном идущих от высоко нагретой центральной области печи с повышенным давлением газовой составляющей в порах (кривая 9 в сравнении с кривой 8).

Отметим, что оценка влияния фильтрационной составляющей необходима для численного расчета температурного поля печи сопротивления.

Литература

1. <http://www.strana-rosatom.ru/№267-43/>
2. **Закожурникова Г.С.** Повышение энергетической эффективности производства карбида кремния на основе моделирования плавильного процесса / Автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.14.04 ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», 2015. С. 1-20.
3. **Кузеванов В.С., Закожурникова Г.С.** Общая модель для расчета поля давления в пористой среде с реагирующими компонентами // Известия ВолгГТУ. Серия Процессы преобразования энергии и энергетические установки. – 2014. –Т. 18 №6 (145)– С. 106-110.
4. **Кузеванов В.С., Закожурникова Г.С.** Расчет поля давления в пористой среде с реагирующими компонентами // Известия ВолгГТУ. Серия Процессы преобразования энергии и энергетические установки. – 2014. –Т. 18 №6 (145)– С. 110-113.

УДК 66.047

Е.В. ГУСЕВ¹, к.т.н., доцент,
А.И. СОКОЛЬСКИЙ², д.т.н., профессор,
К.В. АКСЕНЧИК³, к.т.н., зав. кафедрой

¹Ивановский государственный политехнический университет
153000 г. Иваново, ул. Шереметевский пр., 21

²Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

³Череповецкий государственный университет
162600 г. Череповец, пр. Луначарского 5
E-mail: gusev_pcm@mail.ru

Определение массопроводных свойств капиллярно-пористых тел в области адсорбционно-связанной влаги

Аннотация: рассмотрены математические зависимости по определению массопроводных свойств капиллярно-пористых тел в области низких влагосодержаний высушиваемого материала на основе экспериментально снятых кривых десорбции различных дисперсных материалов.

Ключевые слова: сушка, десорбция, массопроводность, влагосодержание, пористая структура, диффузия, капиллярная конденсация, химический потенциал.

E.V. GUSEV¹ candidate of Engineering, senior lecturer,
A.I. SOKOLSKY² Doktor of Engineering, professor,
K.V. AKSENCHIK, Candidate of Science

¹ Ivanovo State Power Polytechnic University,
153000 Ivanovo, Sheremetevsky St, 21

² Ivanovo State Power Engineering University,
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya, 34

³ Cherepovets State University,
162600, Cherepovets, Lunacharsky Avenue 5
E-mail: gusev_pcm@mail.ru

Definition massoconductivity properties of capillary-porous bodies in the field of the adsorbtsinno-linked moisture

Abstract: mathematical dependences by definition massoconductivity properties of capillary-porous bodies in the field of low vaporосодержаний an exsiccated material on the basis of observationally removed curves of a desorption of various dispersible materials are viewed.

Key words: drying, desorption, massoconductivity, moisturecontent, porous structure, diffusion, capillary condensation, chemical potential.

В современных условиях для выбора способа сушки дисперсных материалов, ее аппаратного оформления с учетом режимов энергосбережения необходима информация об интенсивности удаления связанной влаги из внутрпориистой структуры тела.

О скорости перемещения влаги в капиллярно-пористом высушиваемом теле можно судить по величине эффективного коэффициента влагопроводности $K_{эф}$, который отражает совмещенный перенос влаги в виде жидкости и пара.

Эффективный коэффициент массопроводности $K_{эф}$ зависит от режимных параметров сушки, что дает основание на существование пародиффузионного механизма переноса в высушиваемом теле [1].

Интенсивность перемещения влаги внутри тела в виде пара и жидкости при конвективной сушке соизмеримы только в области низких и средних влагосодержаний материала. При этом качественный и количественный анализ процесса удаления влаги можно провести по результатам исследования основных характеристик пористой структуры материала.

Вся информация о коэффициентах массопроводности (диффузии водяного пара K_n и капиллярной конденсации $K_ж$) заложена только в функции распределения пор по радиусу и связанных с ней кривых десорбции.

Величина эффективного коэффициента влагопроводности $K_{эф}$ в процессе ее обезвоживания является аддитивной функцией потоков водяного пара и конденсата, т. е. является суммой коэффициентов диффузии пара K_n и капиллярной конденсации $K_ж$ [1]:

$$K_{эф} = K_n + K_ж. \quad (1)$$

Зависимости $K_n = f(\bar{U})$ и $K_{ж} = f(\bar{U})$ определяются выражениями:

$$K_n = \frac{\rho_{ж} \vartheta_m D_n (1 - \omega) p_{нас\varphi}}{\rho_o C_m (RT)^2}; \quad (2)$$

$$K_{ж} = \frac{\rho_{ж}}{8 \eta_{ж} \vartheta_m \rho_o C_m} \int_{r_{min}}^{r_{max}} F(r) r^2 dr, \quad (3)$$

где $(1 - \omega)$ - характеризует долю свободных от жидкости пор; $p_{нас\varphi}$ - давление пара, которое однозначно определяется из изотерм десорбции;

$\omega = \int_{f_{min}}^{f_{max}} F(r) dr$ - относительная доля пор занятых жидкостью.

где $F(r) dr = \frac{d\varepsilon}{dr} dr$ - плотность распределения объема пор по размерам на интервале dr ;

$C_m = \frac{\partial \bar{U}}{\partial \mu}$ - удельная массоемкость пористого тела;

$\mu = \frac{-2\sigma \vartheta_m}{r} = -RT \ln \varphi$ - химический потенциал молекул в фазе жидкости и пара.

Коэффициент поверхностной диффузии водяного пара определялся по выражению [2]:

$$D_n = \frac{0,217 \cdot 10^{-4}}{P_T} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,88}, \quad (4)$$

где P_T – давление парогазовой смеси в порах во время опыта, атм.

Используя соотношения

$$\frac{\partial \mu}{\partial \varphi} = \frac{RT}{\varphi}; \quad r = -\frac{2\sigma \vartheta_m}{\mu}, \quad (5)$$

и выражения (2) и (3) можно рассчитать непосредственно из изотерм десорбции $\bar{U}_p = f(\varphi)_t$, минуя промежуточное определение функции распределения пор по размерам, коэффициенты массопроводности:

$$K_n = \frac{M_n D_n (1 - \omega) p_{нас}}{\rho_o RT \frac{d\bar{U}}{d\varphi}}; \quad (6)$$

$$K_{ж} = \frac{\sigma^2 M_n}{2 \eta_{ж} \rho_o RT} \cdot \frac{\int_{\varphi_{min}}^{\varphi_{max}} \frac{d\bar{U}}{d\varphi} \frac{1}{\ln \varphi^2} d\varphi}{\varphi \frac{d\bar{U}}{d\varphi}} \quad (7)$$

На рис. 1 и на рис. 2 представлены рассчитанные из кривых десорбции различных дисперсионных материалов зависимости $K_{эф} = K_n + K_{ж} = f(\bar{U})$ при нормальной температуре воздуха.

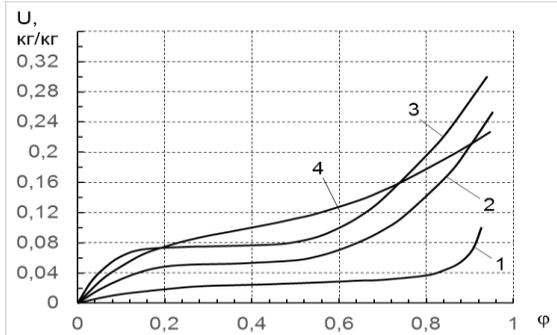


Рис. 1. Кривые десорбции различных дисперсных материалов: 1 – зола гидроудаления; 2 – тальковая руда; 3 – тонкодисперсный кремнезем; 4 – кукурузный крахмал

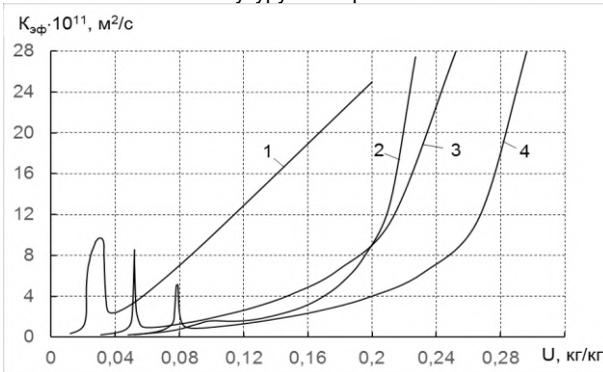


Рис. 2. Зависимость эффективного коэффициента массопроводности различных дисперсных материалов: 1 – зола гидроудаления; 2 – тальковая руда; 3 – тонкодисперсный кремнезем; 4 – кукурузный крахмал.

Из полученных данных (рис. 2) видно, что пародиффузионный механизма переноса влаги для рассмотренных материалов соизмерим только в области низких влагосодержаний. Это дает основание предположить о применении конвективных сушилок интенсивного действия с

активным гидродинамическим режимом тепловой обработки дисперсным материалами в закрученных вихревых газодисперсных потоках [3-4].

Литература

1. **Рудобашта, С.П.** Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. М.: Химия, 1980. 248 с.
2. **Чураев, Н.В.** Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах / Н.В. Чураев. М.: Химия, 1990. 272с.
3. **Фролов, В.Ф.** Моделирование сушки дисперсных материалов / В.Ф. Фролов. Л.: Химия, 1987. 208 с.
4. **Сокольский, А.И.** Сушка дисперсных материалов и разработка инженерного метода расчета аппарата с активной гидродинамикой двухфазного потока: Автореф. дис. докт. техн. наук. Иваново: ИГХТУ, 2006.

УДК 621.31

А.С. РАКИТИН, м.н.с.

Энергетический Институт имени Г.М. Кржижановского
119991, г. Москва, Ленинский проспект, 19
E-mail: asrakitin@yandex.ru

Влияние ВТСП обмоток на стабильность рабочего режима системы криообеспечения энергетического электрооборудования

Аннотация. Рассмотрен тепловой баланс системы криообеспечения энергетического ВТСП электрооборудования. Показана возможность существования устойчивых и неустойчивых точек теплового равновесия в системе "теплообменник криорефрижератора — элементы, обеспечивающие нагрев криожидкости".

Ключевые слова: система криообеспечения, высокотемпературная сверхпроводимость, тепловое равновесие, жидкий азот, электроэнергетика.

A.S. RAKITIN

Krzhizhanovsky Power Engineering Institute
119991, Moscow, Leninsky prospect, 19
E-mail: asrakitin@yandex.ru

Influence of HTS coils at operation mode stability of cryogenic system of power equipment

Abstract. Was explored the thermal balance of cryogenic system of HTS power equipment. Was presented the opportunity of existence at "heat exchanger of cryocooler – elements that provide the heating of cryogenic liquid" system the stable and unstable points of heat equilibrium.

Key words: Cryogenic system, high-temperature superconductivity, thermal equilibrium, liquid nitrogen, power engineering.

Сегодня наиболее распространены системы криообеспечения (СК) высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) энергетического

электрооборудования, где в качестве теплоносителя используется жидкий азот, недогретый до температуры насыщения. В СК данного типа криожидкость, забирая тепло от ВТСП обмоток, помещенных в криостаты [1], прокачивается через теплообменник, где тепло передается в контур криорефрижератора (КР). Выбор средней температуры криожидкости в криостатах связан с необходимостью обеспечить наименьшие затраты энергии в КР на поддержание выбранной температуры. В [2] для ВТСП трансформатора предложена простая математическая модель, позволяющая провести подобный анализ. В таких устройствах, как ВТСП трансформаторы, токоограничители, двигатели и генераторы ВТСП элементы пространственно организованы в виде обмоток, что позволяет обеспечить относительно малый теплоприток через стенки криостатов, а также говорить о некоторой средней температуре $T_{ж}$ как криожидкости, так и ВТСП обмоток.

В соответствии с [2], суммарный теплоприток в СК $Q_{сум}$ составляют потери в обмотках $Q_{обм}(I, T_{ж})$, в тоководах $Q_{ТВ}(I, T_{ж})$, теплоприток через элементы СК $Q_{СК}(T_{ж})$, определяемые соответственно по формулам (1), (2), (3). При этом зависимость $Q_{обм}$ от тока и температуры обмотки получена ниже из общих теоретических соображений [3], и в первом приближении может распространяться на обмотки различных ВТСП устройств. Зависимость $Q_{СК}$ от $T_{ж}$ может включать в себя не только потери в криостате, но и прочих элементах СК.

$$Q_{обм} = Q_{обм}^{78K} \left(\frac{I^3 / I_{кр}(T_{ж})}{I_{ном}^3 / I_{кр}^{78K}} \right) \quad (1)$$

$$Q_{ТВ} = 0.5 I_{ном} \sqrt{\alpha_{VFL} (T_{окр}^2 - T_{ж}^2)} (1 + \beta^2) \quad (2)$$

$$Q_{СК} = Q_{СК}^{78K} (f_{\lambda}(T_{ж}) - f_{\lambda}(T_{ж}^{78K})) \quad (3)$$

Здесь: I – сила тока в обмотке, $I_{кр}(T_{ж})$ – величина критического тока в обмотке, $I_{ном}$ — номинальная I , $T_{окр}$ – температура окружающей среды, α_{VFL} – коэффициент Виндемана-Франца, $\beta = (I/I_{ном})$, f_{λ} и f_{ϵ} – функции [2], отражающие вклад теплопроводности и излучения в $Q_{СК}$. $Q_{обм}^{78K}$ и $Q_{СК}^{78K}$ вычисляются для $I_{ном}$. Из указанных в [2] КР, ниже будут рассмотрены работающие по циклу Стirlingа и турбо-Брайтона. КР характеризует холодопроизводительность (G) и потребляемая мощность (R). Для определенного КР заданная производителем величина УРЭ=R/G [2], зависящая от $T_{ж}$ и номинальной мощности КР, позволяет определить $G = R/УРЭ$ при фиксированном значении R. Фиксация R является условием анализа, поскольку принципиально рассматривается случай выхода КР на установившийся режим работы. Для анализа теплового равновесия условной СК ВТСП устройства была выбрана одна обмотка ВТСП трансформатора [1] с $I_{ном}=1.5кА$ и $Q_{обм}^{78K}=150Вт$.

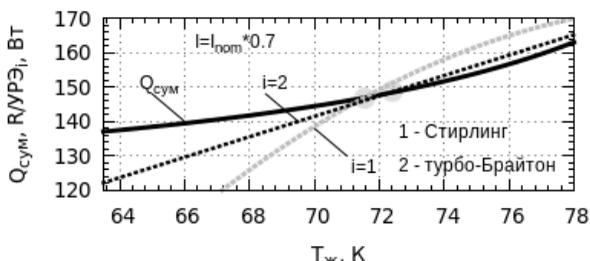


Рис. 1. Тепловое равновесие в системе теплообменник КР – теплоприток к криожидкости при токе 0.7 от номинального, пояснения в тексте

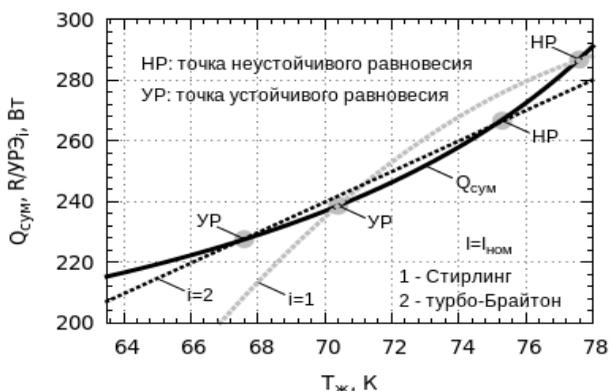


Рис. 2. Тепловое равновесие в системе теплообменник СК — теплоприток к криожидкости при номинальном токе, пояснения в тексте

На рис. 1 для $I=0.7I_{ном}$ приведены результаты для $R=3130\text{ВТ}$ КР по циклу Стирлинга, для $R=2160\text{ВТ}$ КР по циклу турбо-Брайтона. На рис. 2 для $I=I_{ном}$ приведены результаты для $R=1847\text{ВТ}$ КР по циклу Стирлинга, для $R=1274\text{ВТ}$ КР по циклу турбо-Брайтона. При $I=0.7I_{ном}$ наблюдается устойчивое равновесие, а для $I=I_{ном}$ в области высоких температур возникают точки неустойчивого равновесия. Возможна неустойчивость, приводящая переохлаждению азота, и образованию твердой фазы. Полученные результаты носят не директивный характер, а указывают на возможность существования точек неустойчивого равновесия в тепловом балансе СК ВТСП устройств. В конкретном случае необходимо иметь опытные данные по G выбранного КР, опытные данные по потерям в выбранной обмотке (теплоприток через тоководы и элементы СК могут быть рассчитаны). Предложенный анализ необходимо проводить при проектировании СК энергетического ВТСП электрооборудования.

Литература

1. **Волков Э.П. и др.** Первый в России ВТСП трансформатор 1МВА, 10/0,4 кВ. Известия РАН. Энергетика. – 2016. – №3. – с 45-56.
2. **Выбор** рабочей температуры обмоток ВТСП трансформатора / Ракитин А.С. // XII науч.- техн. конф. “Энергия-2017”: тез. докл. ИГЭУ. – Иваново. 2017.
3. **W. J. Carr**, AC loss and macroscopic theory of superconductors. – Pittsburgh, USA, Taylor&Francis, 2001.

УДК 662.986.3

Н.И. ШЕСТАКОВ¹, д.т.н., профессор, зав. кафедрой,
К.В. АКСЕНЧИК², к.т.н., зав. кафедрой
Череповецкий государственный университет
162600 г. Череповец, пр. Луначарского 5
E-mail: shestakovni@chsu.ru¹, akskos@mail.ru²

Экспериментальное и расчетное исследование температурных полей в бетоне в процессе тепловлажностной обработки

Аннотация. В данной работе представлен анализ результатов экспериментального и расчетного исследования режима тепловлажностной обработки бетонных блоков в промышленной пропарочной камере и предложены рекомендации по совершенствованию теплового режима.

Ключевые слова: тепловлажностная обработка, температурное поле, пропарочная камера, режимы тепловлажностной обработки, бетон.

N.I. SHESTAKOV, Doctor of Engineering, professor,
Head of the Department of Heat and Power Engineering,
K.V. AKSENCHIK, Candidate of Science (Technology),
Head of the Department of Chemical Technologies

Cherepovets State University
162600 Cherepovets, Lunacharsky Avenue 5
E-mail: shestakovni@chsu.ru¹, akskos@mail.ru²

Experimental research and calculation of temperature fields in the concrete subjected heat and moist curing

Abstract. The article is presented analysis of results of the experimental research and calculation of the regime of the concrete blocks heat and moist curing in the industrial steam chamber. The article are suggested recommendations about perfecting thermal regime.

Key words: Heat and moist curing, temperature field, steam chamber, regimes of heat and moist curing, concrete.

В производстве бетонных и железобетонных изделий и конструкций тепловлажностная обработка (ТВО) является наиболее энергоемкой и

длительной стадией и преимущественно осуществляется в пропарочных камерах в паровой или паровоздушной среде. По оценкам специалистов ТВО составляет 70-80 % времени в общем цикле производства и на нее ежегодно расходуется более 12 млн. т у.т., при этом наблюдается перерасход энергоресурсов по сравнению с нормами в 2-3 раза. В связи с этим совершенствование тепловой работы пропарочных камер на основе расчетно-экспериментальных исследований процессов тепло- и массообмена является актуальной задачей.

Исследование температурных полей в процессе ТВО проводилось в обычной ямной пропарочной камере с размерами 14,5×5,0×3,0 м и высотой наземной части – 1,8 м на образце-блоке с размерами 59×39×26 см.

Использовались хромель-копелевые термопары типа ТХК-4-1 с диаметром монтажной части 6 мм. Измерение температуры среды в камере производили с помощью жидкостного стеклянного термометра в металлическом чехле с ценой деления 2 °С и диапазоном показаний 0-200 °С. Термометр устанавливали в отверстие на крышке пропарочной камеры в непосредственной близости к исследуемому образцу.

Глубина заделки была различной и составляла для термопар: № 1 – 130 мм, № 2 – 65 мм, № 3 – на поверхности (рис. 1).

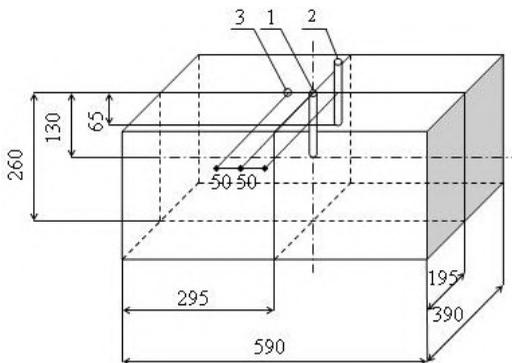


Рис. 1. Схема расположения термопар в образце: 1-3 – номера термопар

В эксперименте использован термосный режим, принятый на предприятии: 3 + 5 + 8 = 16 ч, где 3 ч – предварительная выдержка, 5 ч – подъем температуры среды в камере, 8 ч – термосное охлаждение, при скорости нагрева и охлаждения 14 и 6,5 °С/ч, соответственно.

Экспериментальные данные по динамике температуры в характерных точках образца в процессе его ТВО, полученные в промышленном эксперименте, представлены на рис. 2.

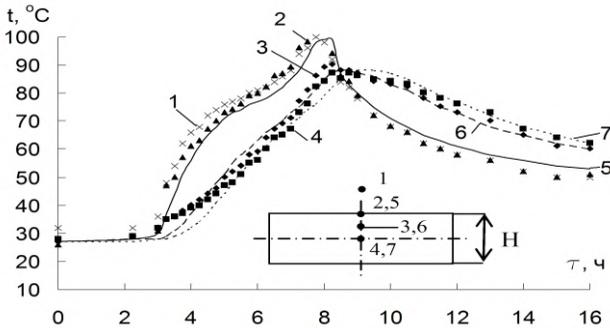


Рис. 2. Динамика температуры среды (1) и температуры в характерных точках образца (2-7): 2-4 – эксперимент; 5-7 – расчет

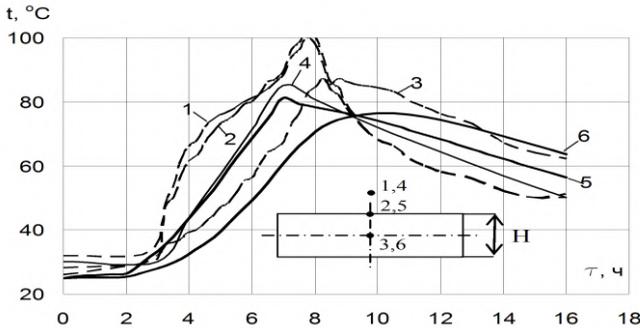


Рис. 3. Динамика температуры среды (точки 1,4) и температуры в характерных точках изделия (точки 2, 3, 5, 6) для режима обработки: 1-3 – базового; 4-5 – предлагаемого

Можно отметить, что в период подогрева и в начале термосной выдержки температура в центре образца $t_{ц}$ меньше, чем температура поверхности образца t_s , затем $t_{ц}$ начинает превышать t_s . На протяжении всего цикла обработки температура в центре образца не достигает температуры поверхности, а перепад температур между средой и поверхностью ($t_{cp} - t_s$) незначителен. Максимальный перепад температур между поверхностью и центром ($t_s - t_{ц}$) в период подогрева составляет 26°C , что в 1,4 раза больше, чем в период термосной выдержки.

Скорость подъема температуры среды в первой половине периода подогрева больше, чем во втором в 2,3 раза, что не позволяет отнести данный нагрев ни к линейному, ни к нагреву с прогрессивно возрастающей скоростью, при котором учитывается нарастание прочности бетона в процессе подъема температуры. Скорость нагрева бетона на поверхности изделия неравномерная и в начале периода подогрева превышает нормативное значение ($20^{\circ}\text{C}/\text{ч}$) в 1,4 раза.

Поверхностные слои образца в конце периода подогрева нагреваются до 100 °С, что создает опасность вскипания воды, резкого увеличения ее объема в порах бетона и, как следствие, разрыхления поверхностных слоев.

Перепад температуры между поверхностью изделия и окружающей средой при выгрузке изделий из камеры составляет 26 °С, что находится в пределах допустимых значений (40 °С).

В результате обработки и анализа экспериментальных данных установлено, что при ТВО по термосному режиму с температурой термосного разогрева 100 °С и длительностью стадий, равной 3+5+8 ч, бетон не набирает требуемой прочности: прочность образцов после ТВО меньше проектной на 13 % (проектная прочность после ТВО – 24,4 МПа), а прочность бетона при сжатии в возрасте 28 сут меньше проектной на 4 % (проектная прочность – 34,9 МПа). Это можно объяснить недостатками применяемого режима обработки: превышением допустимой температуры и скорости нагрева, развитием больших перепадов температуры по сечению образца и, как следствие, недобором бетоном центральных слоев образца проектной прочности.

По разработанной авторами математической модели [1, 2] выполнено моделирование исследованного (базового) режима ТВО бетонных блоков (с размерами 59×39×26 см) и предлагаемого режима. Результаты моделирования базового режима представлены линиями 5-7 на рис. 2, из которого можно отметить хорошее совпадение экспериментальных и расчетных данных. Результаты моделирования предлагаемого режима – на рис. 3.

Для обеспечения проектных значений относительной прочности бетона при сжатии (70 %), скорости нагрева бетона на поверхности и максимальной температуры в изделии предлагается сокращение длительности периода подогрева с 5 ч до 4 ч, при одновременном восстановлении линейного характера нагрева, начальной температуры бетона и температуры предварительной выдержки до проектных значений (25 °С и 30 °С соответственно), что позволит при практически такой же, как в базовом режиме скорости подъема температуры среды в камере (13,7 °С/ч), снизить максимальную скорость нагрева бетона на поверхности до 16,1 °С/ч, т.е. в 1,15 раза по сравнению со значением этого показателя в используемом режиме. Тем самым снижается риск развития разрушений в поверхностных слоях изделия.

Для сохранения длительности цикла обработки, равной 16 ч, предлагается увеличить длительность термосной выдержки с 8 до 9 ч.

Для снижения максимальной температуры в изделии необходимо снизить температуру термосного разогрева до 85 °С, тогда максимальная температура бетона в изделии будет 80,3 °С.

Для обеспечения скорости снижения температуры среды в камере, равной 3,9 °С/ч, рекомендуется провести мероприятия по улучшению тепловой изоляции агрегата.

После ТВО изделия необходимо выдержать в камерах с нормальными температурно-влажностными условиями или принять меры по укрытию поверхностей влагонепроницаемыми материалами с целью уменьшения влажностных напряжений усадки, приводящих к образованию трещин в изделиях.

Использованную в данной работе методику проведения промышленного эксперимента и математическую модель можно применять для обследования энергоэффективности работы действующих пропарочных камер.

Результаты исследования и моделирования положены в основу расчетно-экспериментальной методики [3], которая может использоваться для расчета режимов ТВО сплошных плоских бетонных и железобетонных изделий при проектировании режимов ТВО в ямных и вертикальных пропарочных камерах.

Литература

1. **Аксенчик К.В.** Математические модели процессов тепло- и массообмена и напряженного состояния при тепловлажностной обработке бетона / К.В. Аксенчик // *Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты: Сборник материалов I Международной научно-практической конференции.* – Новосибирск: Издательство НГТУ. – 2012. – С. 120-126.
2. **Аксенчик К.В.** Исследование тепло- и массообмена в бетонных плитах, подвергаемых тепловой обработке / К.В. Аксенчик, Н.И. Шестаков // *Вестник Череповецкого государственного университета.* – 2010. – № 4. – С. 63-67.
3. **Аксенчик К.В.** Методика расчета режимов тепловлажностной обработки железобетонных изделий / К.А. Аксенчик, Н.И. Шестаков // *Вестник Череповецкого государственного университета.* – 2015. – № 5. – С. 9-13.

УДК 621.746.27

С.В. ЛУКИН¹, д.т.н., профессор,
Н.И. ШЕСТАКОВ², д.т.н., профессор

Череповецкий государственный университет
162600 г. Череповец, пр. Луначарского, 5
E-mail: s.v.luk@yandex.ru¹, n.i.shestakov@mail.ru²

Охлаждение, термостатирование и нагрев стальных слябов на линии «МНЛЗ - нагревательная печь»

Аннотация: разработана математическая модель для расчета температурного поля сляба на линии «МНЛЗ – термостат - нагревательная печь», позволяющая оптимизировать режимы охлаждения, термостатирования и нагрева стальных слябов.

Ключевые слова: машина непрерывного литья заготовок, термостат, нагревательная печь.

S.V. LUKIN Doctor of Engineering, professor,
N.I. SHESTAKOV Doctor of Engineering, professor
Cherepovets State University
162600, Cherepovets, Lunacharsky St., 5
E-mail: s.v.luk@yandex.ru¹, n.i.shestakov@mail.ru²

Cooling, thermostating and heating of slabs on the line «Continuous Casting Machine – heating stove»

Abstract. A developed mathematical model for calculating temperature field of slab on the line «CCM – thermostat - heating stove, letting to optimize modes of cooling, thermostating and heating steel slabs.

Key words: continuous casting machine, thermostat, heating stove.

В настоящее время на металлургических комбинатах жидкая сталь разливается преимущественно на машинах непрерывного литья заготовок (МНЛЗ). Горячие слябы, выходящие из МНЛЗ, содержат значительное количество физической теплоты и, при отсутствии поверхностных дефектов, их можно сразу загружать в нагревательные печи, тем самым, снижая удельный расход топлива в печах [1].

Была разработана математическая модель, позволяющая последовательно рассчитывать затвердевание сляба в МНЛЗ, охлаждение на воздухе и в термостате, и нагрев в печи.

При скорости разливки v температурное поле сляба сечением $2A \times 2B$ в МНЛЗ описывается дифференциальным уравнением:

$$C_{эф}(T) \cdot \rho \cdot dT/dt = \text{div}(\lambda_{эф}(T) \cdot \nabla T), \quad (1)$$

где $T = T(x, y, \tau)$ – температурное поле сляба; $\tau = z/v$ – время, проведенное данным сечением сляба в МНЛЗ; z – координата технологической оси МНЛЗ, отсчитываемая от мениска жидкого металла в кристаллизаторе; x, y – декартовы координаты; $C_{эф}, \rho, \lambda_{эф}$ – эффективная теплоемкость, плотность и эффективный коэффициент теплопроводности стали.

Начальным условием для уравнения (1) является:

$$T(x, y, \tau)|_{\tau=0} = T_0, \quad 0 < x < B, \quad 0 < y < A, \quad (2)$$

где $T_0(\tau)$ – температура жидкой стали в промковше.

В центре сляба задаются условия адиабатности:

$$\partial T / \partial x|_{x=0} = 0; \quad \partial T / \partial y|_{y=0} = 0. \quad (3)$$

В кристаллизаторе на поверхности сляба задается условие:

$$-\lambda \cdot \partial T / \partial n|_{\text{пов}} = \sigma / \sqrt{T}, \quad 0 < \tau < \tau_{кр} = L_{кр} / v, \quad (4)$$

где n – координата нормали к поверхности сляба; σ – эмпирический коэффициент; $L_{кр}$ – рабочая длина кристаллизатора.

В ЗВО на широкой грани сляба задается граничное условие:

$$-\lambda \cdot \partial T / \partial x|_{x=\pm B} = k_i \cdot g_i + q_{полн}, \quad \tau_{кр} < \tau < \tau_m = L_m / v, \quad (5)$$

где g_i – удельный расход воды из охлаждающих форсунок в i -й секции ЗВО; L_m – длина МНЛЗ, включая ЗВО с кристаллизатором; k_i – эмпирические коэффициенты; $q_{роli}$ – плотность теплового потока, отводимого роликами в i -ой секции.

При охлаждении на воздухе теплообмен описывается выражением:

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{пов}} = \varepsilon_{\text{пр}} \cdot c_0 \left[(T_{\text{пов}}/100)^4 - (T_{\text{о.с}}/100)^4 \right], \quad T_m < Z < T_m + T_B, \quad (6)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведенная степень черноты; $c_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $T_{\text{пов}}$, $T_{\text{о.с}}$ – абсолютные температуры поверхности сляба и охлаждающей среды; $\tau_B = L_B/v$ – длительность охлаждения на воздухе; L_B – длина зоны воздушного охлаждения.

На поверхности сляба в термостате задается условие:

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{пов}} = q_{\text{терм}}, \quad T_m + T_B < Z < T_m + T_B + T_T, \quad (7)$$

где $q_{\text{терм}}$ – удельные потери теплоты в термостате; τ_T – длительность нахождения в термостате. В идеальном термостате величина $q_{\text{терм}} = 0$.

В термостате происходит выравнивание температуры по сечению сляба, и в нагревательную печь поступают слябы со среднемассовой температурой T_{m0} . В оптимальном случае, когда $T_{m0} = T_m$ (где T_m – требуемая температура металла перед прокаткой), нагрев слябов в печи не требуется.

Если $T_{m0} < T_m$, то необходим нагрев сляба в печи. В печи температура в рабочем пространстве изменяется по зависимостям:

$$T_n(\tau) = T_{n1} + (T_{n2} - T_{n1}) \cdot \tau / \tau_{n1}, \quad 0 < \tau < \tau_{n1}; \quad (8)$$

$$T_n(\tau) = T_{n2}, \quad \tau_{n1} < \tau < \tau_n = \tau_{n1} + \tau_{n2},$$

где τ – время, проведенное слябом в печи; $\tau_n = \tau_{n1} + \tau_{n2}$ – полная длительность нагрева; τ_{n1} , τ_{n2} – длительности нахождения сляба в методической и сварочной зонах; T_{n1} – температура газов на всаде сляба в печь; T_{n2} – температура в сварочной зоне.

Температурное поле сляба в печи описывается уравнением:

$$c(T) \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} (\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial x}), \quad (9)$$

где $T(x, \tau)$ – температурное поле сляба в печи; τ – время нахождения сляба в печи.

В методической и сварочной зонах теплообмен на обеих поверхностях сляба описывается выражением:

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\pm B} = c_{\text{пр}} \cdot \left((T_n(\tau)/100)^4 - (T_{\text{пов}}/100)^4 \right), \quad (10)$$

где $c_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент излучения от греющих газов и кладки к нагреваемому металлу, различный для разных зон печи; T_n , $T_{\text{пов}}$ – абсолютные температуры в печи и на поверхности сляба.

В томильной зоне печи теплообмен описывается выражением:

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\pm B} = 0. \quad (11)$$

Выражения (1) – (11) составляют математическую модель затвердевания, охлаждения, термостатирования, нагрева и томления сляба, позволяющую последовательно рассчитывать температурное поле сляба на линии «МНЛЗ – термостат – нагревательная печь».

На рис. 1 показано изменение температур на поверхности и в центре сляба при разливке сляба толщиной 250 мм со скоростью 1,08 м/мин при оптимальном режиме охлаждения и термостатирования сляба после МНЛЗ когда нагрев в печи не требуется.

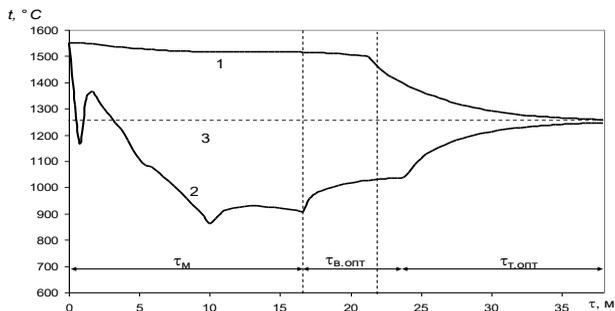


Рис. 1. Оптимальный режим охлаждения и термостатирования сляба в МНЛЗ; 1 – температура в центре сляба; 2 – температура поверхности сляба; 3 – температура металла перед прокаткой

Литература

1. **Оптимальное** использование физической теплоты слябов после МНЛЗ / С.В. Лукин, А.Н. Кибардин // *Металлург.* – 2016. – № 7. – С. 38 – 43.

УДК 536.6

А.В. СОЗИНОВ¹, технический директор,
Ю.Ю. КОЛЬЧУГИНА, инженер
Т.Е. СОЗИНОВА², к.т.н., доцент,
И.А. НИКИФОРОВ, студент

ОАО «ПСК»¹

153007, г. Иваново, м. Минеево, КРАНЭКС

E-mail: sozinov.albert@yandex.ru

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина²

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

E-mail: ste@tef.ispu.ru

Проведение термографического обследования ограждающих конструкций административного здания

Аннотация: проведено тепловизионное обследование административного здания с целью определения скрытых дефектов в ограждающих конструкциях, сделан анализ термограмм, даны рекомендации по улучшению качества изоляции ограждающих конструкций.

Ключевые слова: здания и сооружения, термограмма, тепловизионный контроль, детальное термографирование, тепловизор.

A.V. SOZINOV¹, technical director,
U.U. KOLCHUGINA, engineer
T.E. SOZINOVA² Candidate of Engineering, docent,
I.A. NIKIFOROV, student

OSK «PSK»
153007, Ivanovo, p. Mineevo, KRANEKS
E-mail: sozinov.albert @yandex.ru
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: ste@tef.ispu.ru

Conducting a thermographic survey enclosing structures of administrative building

Abstract: conducted thermal imaging survey of buildings to determine latent defects in building envelopes, is made of thermal analysis, recommendations for improving the insulation quality of walling.

Key words: buildings and structures, thermogram, thermal monitoring, detailed termografiya, thermal imager.

Тепловизионное обследование ограждающих конструкций зданий основано на дистанционном измерении тепловизором полей температур поверхностей ограждающих конструкций [1].

Тепловизионная съемка позволяет бесконтактно контролировать качество теплоизоляции ограждающих конструкций. Метод тепловизионного контроля основан на визуализации температурных аномалий для определения дефектов в виде областей повышенных теплопотерь, связанных с нарушением теплоизоляции [1].

Для здания Технического центра ОАО «ПСК» было проведено качественное детальное термографирование с составлением отчета о термографическом обследовании.

В соответствии с МДС 23-1.2007 [2] термографическая съемка должна проводиться при устойчивой работе системы отопления и при наружной температуре близкой к среднесуточной. Оптимальное время для проведения тепловизионной съемки – поздний вечер (21-24 ч.) или утро (10-12 ч.) [2].

Тепловизионное обследование наружных поверхностей Технического центра ПСК было проведено 27 января 2017 года с 21:00 до 21:45 при температуре окружающего воздуха –3°С. Погодные условия соответствовали требованиям проведения обследования (отсутствие атмосферных осадков, тумана и задымленности [1]). Температурный напор был выше требуемого предела в 10-15 °С (требования ГОСТ Р 54852-2011 [1]) и составлял не менее 20 °С. Погода безветренная.

В процессе обследования было снято 120 термограмм.

Тела с температурой поверхности 300 К имеют максимум спектрального излучения в диапазоне длин волн 7-15 мкм [3]. Для термографического обследования здания Технического центра ПСК, был использован современный тепловизор testo 882, который работает в указанном диапазоне длин волн.

Тепловизор Testo 882 имеет высокое разрешение 320×240 пикселей (76 800 температурных точек), что позволяет получать четкие и детальные снимки [4].

Температурные поля обследуемых поверхностей ограждающих конструкций выводятся на экран тепловизора в виде псевдоцветного или монохромного изображения изотермических поверхностей. Цвет и яркость изображения соответствуют различным температурам. Температурные поля и другая сопутствующая измерениям информация записываются в виде термограмм во встроенной памяти тепловизора.

Тепловизор поставляется с программным обеспечением, необходимым для хранения и анализа инфракрасных изображений (определения тепловых аномалий, построения термопрофилограмм и т.д.). Термограммы, записанные во встроенной памяти тепловизора, в последующем были визуализированы и подвергнуты компьютерной обработке для обработки результатов измерений и составления отчета. По завершении тепловизионной съемки была проведена детальная обработка всех термограмм в палитре 25 цветов, позволяющей наиболее наглядно представить распределение температур на поверхности объекта. В правой части термограмм располагается температурная шкала, соответствующая цветовой палитре.

При выполнении качественного анализа инфракрасная съемка сопровождается фотографиями обследуемого объекта.

Анализ термограмм, полученных в результате тепловизионного обследования, позволяет сделать следующие выводы:

- состояние наружных стен здания техцентра в целом удовлетворительное, т.к. температурное поле на глади всех наружных ограждений здания достаточно однородно;
- в местах установки отопительных приборов наблюдается повышение температуры: в местах установки отопительных приборов с восточной стороны здания температура на 1-2 °С выше средней температуры стены, с западной стороны – на 3-5 °С (отопительные приборы в момент проведения обследования имели температуру не менее 65 °С);
- поверхность окон 1, 2 и 3 этажей корпуса имеют неоднородность в верхней части оконного проема (температурный контраст составляет 5-8 °С), что говорит о плохом качестве оконных переплетов;
- поверхность окон четвертого этажа однородна, что указывает на одинаковые теплопотери через них (окна 4 этажа были заменены на новые в 2001 году);
- у ряда окон нарушено остекление;
- состояние дверей удовлетворительное.

На основании проведенного анализа предложены рекомендации по улучшению качества изоляции ограждающих конструкций технического центра ПСК:

1. Для уменьшения тепловых потерь ограждениями здания по возможности продолжать замену окон.

2. Установить теплоотражающие экраны за отопительными приборами.

3. Провести регулирование системы отопления (выравнивание температур отопительных приборов по периметру здания).

Вывод. В результате инструментального тепловизионного обследования была получена исчерпывающая информация о качестве ограждающих конструкций корпуса.

В целом, по результатам обследования может быть сделано заключение о хорошем уровне теплозащиты ограждающих конструкций здания Технического центра ОАО «ПСК».

Литература

1. **ГОСТ Р 54852-2011.** Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций. – Введ. 2011-12-15. – М.: Стандартиформ, 2012. – 16 с.
2. **МДС 23-1.2007.** Методические рекомендации по комплексному теплотехническому обследованию наружных ограждающих конструкций с применением тепловизионной техники. / Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский центр «Строительство». – Введ. 2007-07-01. – М.: ФГУП «НИЦ «Строительство», 2007. – 10 с.
3. **Бухмиров В.В.,** Созинова Т.Е. Тепловизионное обследование зданий и сооружений ИГЭУ // Материалы международной научно-технической конференции «Состояния и перспективы развития электротехнологии» (XVII Бенардосовские чтения). – Иваново: ФГБОУВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина», 2013. Т. 2. – С. 153-156.
4. **Testo 882** – тепловизор с NDT < 60 мК [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.testo.ru>. – Официальный сайт Testo в России. – (Дата обращения: 15.02.2017).

УДК [677.021:533.6]:519.778

Е.Е. КОРОЧКИНА¹, к.т.н., доцент,
О.В. БЛИНОВ, к.т.н., доцент,
А.В. КОМКОВ, магистрант,
И.А. СУВОРОВ, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
150003, Иваново, ул. Рабфаковская 34
Ивановский государственный политехнический университет
153037, Иваново, ул. 8 Марта, д. 20
E-mail: fmkee@yandex.ru¹

Разработка программно-аппаратного комплекса для моделирования и мониторинга оптимально теплового режима РЭА

Аннотация: в статье представлены методы проектирования радиоэлектронной аппаратуры и способы моделирования теплового режима на этапе проектирования для повышения надежности работы аппаратуры в целом с использованием свободно распространяемого программного обеспечения.

Ключевые слова: метод конечных элементов, моделирования теплового режима.

E.E. KOROCHKINA, ph.D. associate professor,
O.V. BINOV, ph.D. associate professor, A.V. KOMKOV, undergraduate,
I.A. SUVOROV, undergraduate

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
Ivanovo State Polytechnic University,
153037, Ivanovo, 8 Marta St., 20

Development of hardware and software for modeling and komplex monitoring optimum thermal regime of REA

Abstract. The article presents the design techniques of designing electronic equipment and ways of modeling the thermal regime at the design stage to improve the reliability of work of equipment, using free software.

Key words: finite element modeling, thermal regime.

Перегрев – это основной критический показатель в компьютерных технологиях. Технологии систем охлаждения объединяют методы получения, способы и средства измерения различных температур; приборы и оборудование, реализующие эти методы; системы управления температурными процессами. Нами разработано средство электроизмерения температур элементов электронной платы. Для того, чтобы произвести мониторинг температурного поля основных элементов материнской платы форм фактора ATX, нами был произведен анализ существующих систем измерения температуры. На начальном этапе решения постав-

ленной задачи, было необходимо изучить и выявить наиболее экономически выгодную систему. Оборудование для электронного измерения температур, на сегодняшний день представлено в довольно большом ассортименте, основное их различие в измеряемом диапазоне температур, интерфейсе подключения и скорости обработки данных. Задача выбора датчика мониторинга температур заключается в анализе свойств датчиков, существующих на сегодняшний день, и их стоимости. Мы провели анализ стоимости датчиков, информации о подключении, а также габаритные размеры и выбрали датчик DS18S20, его мы и использовали для реализации поставленной задачи[1].

Подключения датчика осуществлено по протоколу 1-Wire-net, который данных представляет собой информационную сеть, использующую для осуществления цифровой связи 1-Wire-магистраль, состоящую из шины (DATA) и возвратной шины (RET). Таким образом, для реализации среды обмена этой сети могут быть применены доступные кабели, содержащие не экранированную витую пару той или иной категории, и даже обычный телефонный шнур. Такие кабели при их прокладке не требуют наличия специального оборудования, а ограничение максимальной протяжённость кабеля 1-Wire-магистрали регламентировано разработчиками на уровне 300 м. Основой архитектуры 1-Wire-сетей является топология общей шины, когда каждый из абонентов подключён непосредственно к единой магистрали, без каких-либо каскадных соединений или ветвлений. При этом в качестве базовой используется структура сети с одним ведущим или мастером и многочисленными ведомыми абонентами. Конфигурация любой 1-Wire-сети может произвольно меняться в процессе её работы, не создавая помех дальнейшей эксплуатации и работоспособности всей системы в целом, если при этих изменениях соблюдаются принципы организации 1-Wire-интерфейса [2]. Схема подключения температурного датчика DS18S20 через Arduino по средствам адаптера на COM-порт представлена на рис. 1.

Arduino – это инструмент для проектирования электронных устройств (электронный конструктор) более плотно взаимодействующих с окружающей физической средой, чем стандартные персональные компьютеры, которые фактически не выходят за рамки виртуальности. Это платформа, предназначенная для «physical computing» с открытым программным кодом, построенная на простой печатной плате с современной средой для написания программного обеспечения. Arduino применяется для создания электронных устройств с возможностью приема сигналов от различных цифровых и аналоговых датчиков, которые могут быть подключены к нему, и управления различными исполнительными устройствами. Проекты устройств, основанные на Arduino, могут работать самостоятельно или взаимодействовать с программным обеспечением на компьютере (напр.: Flash, Processing, MaxMSP). Нами разработана программа для получения температуры элементов платы. Она позволяет выполнять операции поиска датчиков температуры,

обрабатывать полученные ими данные о температуре в десятичном коде, после чего передавать эти данные на обработку для вывода показаний в градусах °С. Программный продукт может опрашивать датчики преобразовывать их сигнал и выводить на дисплей их показания в градусах, °С

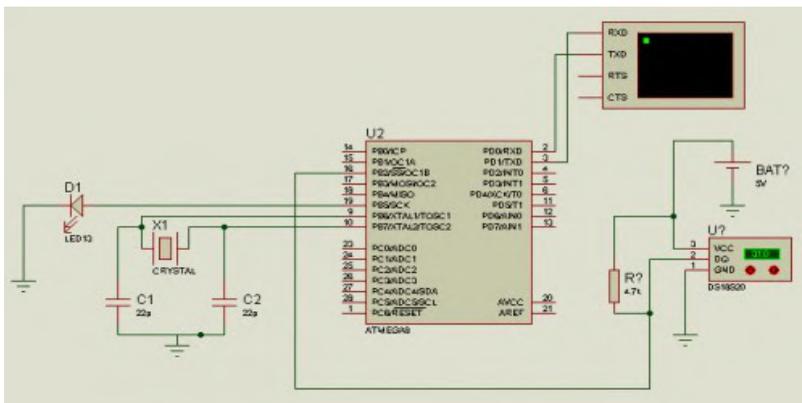


Рис. 1. Схема подключения датчика DS18S20

Полученные данные показания температур, замеряемых элементов платы, представляем в виде графиков с координатами (Т, °С ; t, с). Реализация построения графиков мы получаем с помощью программы Open Office «Электронная таблица». Электронная таблица — компьютерная программа, позволяющая проводить вычисления с данными, представленными в виде двумерных массивов, имитирующих бумажные таблицы.

Путем импортирования таблицы с показаниями датчиков из протокола 1-Wire™ строим графики изменения температур, как показано на (рис. 2).

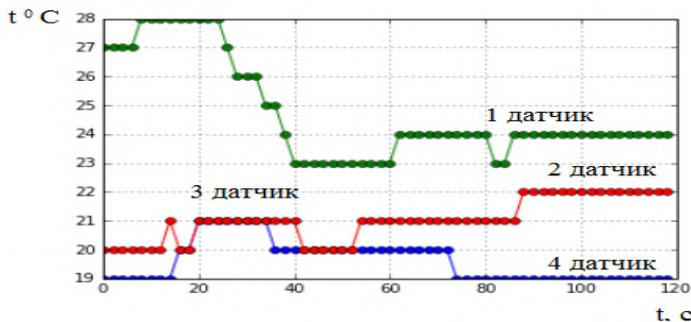


Рис. 2. Графики изменения показателей датчиков температур во времени

Лабораторная установка проходила испытания на рабочей материнской плате форм фактора АТХ. Места для установки датчиков выбирались исходя из узлов платы, которые подвержены наивысшим температурным изменениям в процессе работы и выполнения не стационарных задач. В данном случае такими местами являлись – процессор, южный и северный мосты.

Нами разработан аппаратно-программный комплекс для определения температур элементов электронных плат с внутренними источниками теплоты такие как центральный процессор, северный и южный мосты. Данное устройство позволяет проводить анализ перегревов оборудования в зависимости от загрузки процессора на счет. Обработка полученных данных и вывод графиков изменения температур в зависимости от сложности выполнения задач.

Литература

- 1.<http://robocraft.ru/blog/438.html> [электронный ресурс] – информация о датчике DS18S20
- 2.<http://www.compel.ru/2012/07/17/max31826-vyisokotochnyy-1-wire-datchik-temperatury-i-s-eprom/> [электронный ресурс] - MAX31826 – высокоточный 1-Wire датчик температуры

УДК 66.048

М.М. ФАРАХОВ, научный сотрудник

Т.М. ФАРАХОВ, к.т.н.

А.Г. ЛАПТЕВ¹, д.т.н., профессор

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

420066 г. Казань, ул. Красносельская 51

E-mail: tvt_kgeu@mail.ru¹

Гидравлические характеристики хаотичных насадок с шероховатой поверхностью

Аннотация: рассмотрена конструкция хаотичной металлической насадки для тепло- и массообменных аппаратов. Представлены обобщенные результаты экспериментальных исследований насадки. Приведены данные по гидравлическому сопротивлению и предельным нагрузкам.

Ключевые слова: теплообмен, насадки, перепад давления, колонные аппараты.

M.M. FARAKHOV research scientist,

T.M. FARAKHOV, Candidate of Engineering Sciences,

A.G. LAPTEV Doctor of Engineering, professor

Hydraulic characteristics of chaotic fittings with rundy surface

Abstract: the design of a chaotic metal nozzle for heat and mass transfer devices is considered. Generalized results of experimental studies of the nozzle are presented. Data on hydraulic resistance and ultimate loads are given.

Key words: heat and mass transfer, attachments, pressure drop, column apparatus.

Контактные насадки используются в тепло- и массообменных аппаратах для проведения различных процессов в химической технологии и теплоэнергетики. Известны [1,2] многие сотни конструкций хаотичных и регулярных насадок. В Инженерно-внедренческом центре "Инжехим" разработан ряд элементов, которые внедряются в различных отраслях промышленности [3,4].

При разработке конструкций регулярных и нерегулярных насадочных элементов учитывались и анализировались реальные физические процессы, происходящие при массообмене. Так, например, известно, что при ректификации большинства смесей и абсорбции легко растворимых газов сопротивление массопередаче от 60 до 90% сосредоточено в паровой фазе. В этих случаях организуется интенсивная турбулизация паровой (газовой) фазы за счет различных конструктивных решений по форме насадки. Если основное сопротивление массопередаче сосредоточено в жидкой фазе, то необходима организация волнового и даже турбулентного пленочного течения по элементам насадки.



Рис. 1. Вид элемента

Элемент разработанной насыпной насадки для массообменных аппаратов, выполнен в виде полого тела вращения, поверхность которого образована расположенными одна против другой выгнутыми наружу полосами листового материала с смежными полосами и ребрами вдоль тела вращения. Полосы листового материала выполнены параллельными и профилированными и смещены относительно друг друга на ширину полосы, а ребра выполнены закругленными (рис. 1). Свободный объем насадки

0,94-0,98 м³/м³; удельная поверхность: для диаметра d_э 12 мм - 420; 16 мм - 270; 24 мм - 170; 60 мм - 70 м²/м³.

Гидравлические испытания насадок проводились на экспериментальной установке диаметром 600 мм, высота колонны 2600 мм, число точек орошения до 1030 шт/м². Исследования выполнялись на системе воздух – вода при высоте слоя 1 м. Фиктивная скорость газа в колонне достигала 5,82 м/с, плотность орошения составляла 20, 40, 60 и 80 м³/(м²час).

отбойный элемент.

Сопротивление слоя сухой насадки определяется по известному уравнению Дарси-Вейсбаха

$$\Delta P_{\text{сyx}} = \xi_0 \cdot \frac{H}{d_{\text{э}}} \cdot \frac{\rho_r \cdot \omega_r^2}{2} \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{сух}}$ – гидравлическое сопротивление сухой насадки, Па; ξ_0 – коэффициент сопротивления сухой насадки; H – высота слоя насадки, м; ρ_{Γ} – плотность газа, кг/м³.

В выражении (1) $\xi_0 = A \cdot \text{Re}_{\Gamma}^B$, где A и B – эмпирические коэффициенты.

В результате обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов получены следующие выражения для определения гидравлического сопротивления сухих и коэффициентов сопротивления орошаемых насадок различных эквивалентных диаметров:

для $d_э$ 8 мм и $d_э$ 16 мм: $A=1,597$ и $B=0,134$,

для $d_э$ 24, 35, 45, 60 мм: $A=0,559$ и $B=0,039$.

При работе колонны в пленочном режиме для определения гидравлического сопротивления орошаемой насадки используют выражение аналогичное (1), только с коэффициентом сопротивления орошаемой насадки $\xi_{op} = \xi_0 + c \text{Re}_{\Gamma}^k \text{Re}_{ж}^m$. Получено:

$$\text{– для } d_э \text{ 8мм } \xi_{op} = \xi_0 + 0,149 \text{Re}_{\Gamma}^{0,387} \text{Re}_{ж}^{0,525},$$

$$\text{– для } d_э \text{ 16мм } \xi_{op} = \xi_0 + 0,231 \text{Re}_{\Gamma}^{0,228} \text{Re}_{ж}^{0,848},$$

$$\text{– для } d_э \text{ 24мм } \xi_{op} = \xi_0 + 2,595 \text{Re}_{\Gamma}^{-0,188} \text{Re}_{ж}^{0,884},$$

$$\text{– для } d_э \text{ 35мм } \xi_{op} = \xi_0 + 27,1 \text{Re}_{\Gamma}^{-0,5} \text{Re}_{ж}^{0,371},$$

$$\text{– для } d_э \text{ 45мм } \xi_{op} = \xi_0 + 4,24 \text{Re}_{\Gamma}^{0,35} \text{Re}_{ж}^{1,191},$$

$$\text{– для } d_э \text{ 60мм } \xi_{op} = \xi_0 + 0,038 \text{Re}_{\Gamma}^{0,175} \text{Re}_{ж}^{1,137}.$$

В результате анализа полученных результатов сделаны следующие выводы: новая насадка имеет широкий интервал рабочих скоростей по газовой и жидкой фазам при пленочном режиме; режим подвисания начинается при скорости газа 1,7÷2,5 м/с в зависимости от плотности орошения (система воздух – вода); началу режима захлебывания соответствует перепад давления на 1 м слоя насадки около 1000 Па. Установлено, что сопротивление сухого слоя новой насадки на 30–40% ниже, чем у колец Палля аналогичного размера.

Уравнение Бэйна и Хоугена для новой насадки получено в виде:

$$\lg \left(\frac{W_3^2 a_{\Gamma} \rho_{\Gamma}^{0,16}}{\pi \varepsilon_{\text{св}} \rho_{ж}} \right) = -0,48 - 1,07 \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \left(\frac{\rho_{\Gamma}}{\rho_{ж}} \right)^{0,125} \quad (2)$$

где L, G – массовые расходы жидкости и газа, кг/с; W_3 – скорость начала захлебывания, м/с.

Выражение для расчета динамической составляющей задержки жидкости в слое насадки обобщено в форме: $\delta_{\text{дин}} = 0,65 \text{Re}_{\text{ж}}^{0,49} \text{Ga}^{-0,35}$.

Выражение получено при $d_s = 0,015 \div 0,038$ м и плотности орошения от 3,5 до 35 м³/(м²ч) при пленочном режиме.

Аналогичные конструкции насадок внедрены в более пятидесяти промышленных аппаратах [2-4].

Литература

1. **Сокол Б.А.**, Чернышев А.К., Баранов Д.А. Насадки массообменных колонн. – М.: «Галилея-принт», 2009. – 358 с.
2. **Каган А.М.**, Лаптев А.Г., Пушнов А.С., Фарахов М.И. Контактные насадки промышленных теплообменников аппаратов; под ред. А.Г. Лаптева. – Казань: Отечество, 2013. – 454 с.
3. **Лаптев А.Г.**, Фарахов Т.М., Дударовская О.Г. Эффективность явлений переноса в каналах с хаотичными насадочными слоями. – СПб.: Страта, 2016. – 214 с.
4. **Лаптев А.Г.**, Башаров М.М. Эффективность теплообмена и разделения гетерогенных сред в аппаратах нефтегазохимического комплекса. – Казань: Центр инновационных технологий, 2016. – 344 с.

УДК 621.313.333

В.А. АРТЕМЬЕВА, магистр, Р.Н. ГАБИТОВ, ст. преподаватель,
О.Б. КОЛИБАБА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Экспериментальное исследование окислительного пиролиза твердых бытовых отходов

Аннотация. Проведен термический анализ смеси твердых бытовых отходов (ТБО) среднего морфологического состава и отдельных ее компонентов в целях разработки способов повышения эффективности ее энергетического использования в термических реакторах.

Ключевые слова: ТБО, термогравиметрический анализ, окислительный пиролиз, тепловые эффекты.

V.A. ARTEM'EVA, postgraduate student, R.N. GABITOV, senior lecturer,
O.B. KOLIBABA, candidate of engineering, assistant professor
Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

Experimental study of oxidative pyrolysis of municipal solid waste

Abstract. Spend a thermal analysis of the mixture of municipal solid waste (MSW) average morphological structure and its components in order to develop ways to improve the efficiency of its energy use in thermal reactors.

Key words: MSW, thermal gravimetric analysis, oxidative pyrolysis, thermal effects.

В настоящее время существует возможность экономически выгодно, экологически безопасно и технически доступно перерабатывать ТБО без предварительной сортировки, используя термические методы, в том числе пиролиз.

В технологиях переработки ТБО используют различные схемы пиролизных установок [1], например, шахтные печи, в которых процесс пиролиза сопровождается небольшими подсосами воздуха (окислительный пиролиз). Метод окислительного пиролиза с последующим сжиганием пиролизных газов универсален и не зависит от фракционного состава и фазового состояния отходов, их влажности и зольности. При этом, продукты сгорания пиролизных газов меньше загрязнены летучей золой и сажей по сравнению с прямым сжиганием ТБО, что существенно упрощает схему газоочистки.

Для повышения эффективности переработки ТБО методом окислительного пиролиза актуальной задачей является экспериментальное исследование данного процесса с целью оценки влияния ряда параметров (влажность исходного сырья, состав ТБО, увеличение кислорода в атмосфере и др.) на выход и состав пиролизных газов [2,3,4].

Целью работы являлось проведение термического анализа смеси ТБО среднего морфологического состава и отдельных ее компонентов для разработки способов повышения эффективности ее энергетического использования в теплотехнологии.

В качестве методов термического анализа для исследования процесса малоокислительного пиролиза ТБО использованы:

- термогравиметрический анализ (ТГ-анализ) [5], в ходе которого непрерывно регистрировалось изменение массы исследуемого образца при изменении его температуры;
- дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК), в ходе которой непрерывно регистрировались термические эффекты, которыми сопровождалась фазовые и химические превращения образца при его нагреве.

Исследования малоокислительного пиролиза были проведены для образцов смеси ТБО среднего морфологического состава (бумага - 43%, текстильные отходы – 7.5%, полимерная пленка – 7.5% и пищевые отходы - 42%) и отдельных компонентов смеси в атмосфере с содержанием кислорода 1% и 10%. Экспериментальные исследования выполнены при помощи комплекса синхронного термического анализа фирмы NETZSCH. Измерительный комплекс состоит из блока термического анализа STA 449 F3 Jupiter, квадрупольного масс-спектрометра QMS 403 C Aeolos и блока импульсного термического анализа PulseTA.

При синхронном ТГ–ДСК-анализе термоанализатор позволяет одновременно измерять изменение теплового потока и массы образца в зависимости от его температуры или во времени. Синхронный анализ позволяет не только обрабатывать большое число измерений, но и упрощает интерпретацию результатов, благодаря возможности отде-

лить эндо- и экзотермические процессы, не сопровождающиеся изменением массы от процессов, при которых происходит изменение массы.

В результате термического анализа получены так называемые термогравиметрические (ТГ) кривые – зависимости изменения массы навески от температуры или во времени. По значению производной от ТГ кривой (дифференциально-термогравиметрический анализ - ДТГ) можно установить температуру или интервал времени, при которых происходит максимальное уменьшение массы навески.

Методом дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) было определено количество теплоты, которое выделяется или поглощается в результате химических реакций.

Экспериментальные исследования малоокислительного пиролиза проводили в следующей последовательности. Образец ТБО загружали в платиновый тигель, который устанавливали на микровесах в первой ячейке дифференциально сканирующего ДСК-сенсора. Во вторую ячейку помещали образец сравнения - тигель без образца (эталон). Наличие двойной измерительной ячейки позволяет компенсировать посторонние воздействия (процессы, связанные с тепловыделением или теплопоглощением) на результат измерения. Теплота подводилась от электронагревателя камеры, внутри которой были установлены образцы. Масса навески варьировалась в пределах 3÷15 мг. Температуру исследуемого образца измеряли дифференциальными термопарами, размещенными на нижней поверхности тигля, которые были подключены к вторичному прибору. Нагрев проводили в среде инертного газа (аргона), обогащенного кислородом (1 или 10% об.) от 20°С до 900°С со скоростью 5°С/мин.

В ходе опыта STA 449 F3 Jupiter непрерывно регистрировал убыль массы образца ТБО в процессе его нагрева (ТГ-кривая), температуру образца и ДСК сигнал. Предельная чувствительность прибора по массе составляла 0.1 мкг, а по температуре – 0.001°С.

Результаты термического анализа образца смеси ТБО, состоящего из бумаги, текстильных, пищевых отходов и полимерной пленки, представлен на рис. 1 в виде ДСК, ТГ и ДТГ кривых.

Таблица 1. Результаты термического анализа ТБО и его компонентов

№	Температуры начала и окончания процесса пиролиза, °С		Максимальная скорость убыли массы, %/мин		Тепловой эффект пиролиза, Дж/г	
	1%	10%	1%	10%	1%	10%
Содержание						
Смесь ТБО	225÷540	215÷550	4,27	5,89	4250	6685
Бумага	245÷492	245÷488	6,06	6,61	4951	6624
Картофель	225÷540	215÷550	5,29	6,75	3672	6696
Полиэтилен	340÷540	280÷550	6,67	5,23	3954	8685
Ткань	240-500	240-490	10,4	8,68	4376	5925

Результаты термического анализа процесса пиролиза смеси ТБО и отдельных ее компонентов в среде с содержанием кислорода 1% и 10% приведены в табл.1.

Литература

1. **Basu P.** Biomass gasification and pyrolysis. Practical design and Theory – Published by Elsevier. 2010. – 365 p.
2. **Кузнецов Г.В.**, Полсонграм М. Зависимость состава продуктов пиролиза древесной биомассы от режима теплового воздействия // Научно - технический вестник Поволжья. – 2011. – № 1. – С. 125–129.
3. **Кузнецов Г.В.**, Полсонграм М. Влияние режима теплового воздействия на состав продуктов пиролиза древесной биомассы // Бутлеровские сообщения. – 2011. – Т. 25. – № 7. – С. 101–104.
4. **Любов В.К.**, Любова С.В. Повышение эффективности энергетического использования биотоплив. – Архангельск, 2010. – 496 с.
5. **Уэндландт У.** Термические методы анализа. М.: Мир, 1978. – 527 с.

УДК 628.87

М.В. ПРОРОКОВА¹, ст. преп.,
В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: prorokova_mv@list.ru

Оценка эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий

Аннотация: рассмотрены недостатки существующих методов анализа эффективности энергосберегающих мероприятий. Предложен новый критерий оценки эффективности внедрения энергосберегающих решений для зданий непроизводственного назначения – уровень комфортности микроклимата

Ключевые слова: энергосбережение, уровень комфортности микроклимата

M.V. PROROKOVA¹, S. Lecturer.,
V.V. BUKHMIROV, Doctor of Engineering, professor,

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: prorokova_mv@list.ru

Evaluation of the efficiency of the realization of energysaving projects

Abstract: shortcomings of the existing methods of the estimation of effectiveness in the energy-saving measures are examined. Is proposed the new criterion of evaluation of energy-saving measures for the buildings of non-production designation – the level of the comfort of the microclimate

Key words: Energy saving, level of comfort of microclimate

В работах [1, 2] показано, что здания непроизводственного назначения (жилые, общественные и административные) обладают значительным потенциалом энергосбережения. При этом наиболее распространенным методом повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в системах энергопотребления является внедрение энергосберегающих мероприятий. Вывод о целесообразности внедрения энергосберегающих решений делают на основе анализа показателей экономической эффективности проектов, к которым чаще всего относят срок окупаемости мероприятия и чистый дисконтированный доход. Указанные величины рассчитывают на основе технического эффекта от реализации мероприятия (экономии соответствующего энергоресурса в натуральном выражении). При оценке мероприятий, направленных на сокращение потребления тепловой энергии за счет повышения теплозащитных свойств объекта (снижение количества инфильтрационного воздуха за счет герметизации, наложение тепловой изоляции и т.п.), актуальной задачей является выбор расчетных параметров наружного и внутреннего воздуха. При этом наиболее распространенные методики предлагают в качестве расчетных параметров наружного воздуха использовать данные СП 131.13330.2012 Строительная климатология, а для внутренней среды – значения параметров микроклимата, используемые при проектировании соответствующих систем энергоснабжения.

Как показывает анализ результатов внедрения энергосберегающих мероприятий [1, 3, 4], данный способ оценки часто приводит к значительному ухудшению условий внутренней среды для пребывания человека. Например, внедрение мероприятий по герметизации объекта может привести к снижению воздухообмена, что вызовет повышение концентрации углекислого газа в воздухе помещений, и поэтому отрицательно влияет на здоровье и работоспособность человека. Внедрение проектов по сокращению потребления тепловой энергии может изменить температуру внутренней среды до значений, некомфортных для человека. Указанные отрицательные последствия реализации энергосберегающих мероприятий требуют дополнительных мер, повышающих комфортность внутренней среды зданий.

Таким образом, подход к оценке внедрения энергосберегающих мероприятий, основанный на расчете только показателей их экономической эффективности, требует корректировки в плане создания или поддержания после внедрения проекта комфортных условий для пребывания человека.

Предложено в качестве показателя эффективности внедрения проектов энергосбережения использовать новый интегральный критерий комфортности внутренней среды помещений – уровень комфортности микроклимата, по изменению значения которого в результате реализации потенциала энергосбережения можно будет судить о влиянии энергосберегающего мероприятия на параметры внутренней среды здания

и, как следствие, сделать вывод о необходимости выполнения дополнительных мер, направленных на повышение комфорта, которые влияют на экономическую эффективность энергосберегающего проекта.

Критерий комфортности микроклимата – уровень комфортности микроклимата учитывает тепловой комфорт человека в помещении, основные вредности, характерные для помещений производственного и непроизводственного назначения, а также качество воздушной среды:

$$U_{\text{ком}} = \beta(K_{\text{ТК}} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 + K_{\text{КС}} \cdot \varepsilon_3)$$

где $K_{\text{ТК}}$ – коэффициент комфортности теплового состояния человека (тепловой коэффициент комфорта); ε_1 – поправка, учитывающая влияние на комфортность микроклимата радиационного охлаждения; ε_2 – поправка, учитывающая влияние на комфортность микроклимата асимметрии теплового излучения; $K_{\text{КС}}$ – коэффициент качества воздушной среды, учитывающий соответствие качества воздуха нормам, установленным ГОСТ 30494-2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях»; ε_3 – поправка на дополнительные вредности, снижающие качество воздушной среды (пыль и прочие примеси); β – коэффициент, учитывающий тип зданий (для зданий непроизводственного назначения $\beta=1$, а для промышленных зданий $\beta > 1$).

Подробно методика расчета уровня микроклимата для зданий непроизводственного назначения приведена в [4].

Исходными данными для расчета уровня комфортности микроклимата ($U_{\text{ком}}$) являются: тип работ, выполняемых в обследуемом помещении, температура воздуха в помещении, его относительная влажность и подвижность, температура ограждающих поверхностей и концентрация углекислого газа в помещении (кратность воздухообмена). Уровень комфортности микроклимата для общественных и административных зданий изменяется от – 1 до 1. При этом абсолютно комфортному микроклимату соответствует нулевое значение уровня комфортности.

При оценке эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий существующий уровень комфортности микроклимата $U_{\text{ком.1}}$ (до внедрения) рассчитывают по параметрам внутренней среды, полученным в результате инструментального обследования, а уровень комфортности микроклимата после выполнения процедуры энергосбережения $U_{\text{ком.2}}$ рассчитывают по расчетным значениям параметров микроклимата при помощи специально разработанной математической модели процессов тепломассообмена в помещении [5, 6]. Затем сравнивают уровни комфорта до и после внедрения энергосберегающих мероприятий и делают вывод об эффективности их внедрения, учитывая при этом, естественно, и экономические показатели.

Вывод. Предложен новый способ оценки эффективности внедрения энергосберегающих мероприятий для зданий, предназначенных для долговременного пребывания людей, учитывающий экономические показатели эффективности и условия пребывания людей в помещениях.

Литература

1. **Табунщиков Ю.А.** Микроклимат и энергосбережение: пора понять приоритеты // АВОК. – 2008. – № 5. – С. 4 – 11.
2. **Табунщиков Ю.А.** Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий / Ю.А. Табунщиков, М.М. Бродач. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2002. – 194 с.
3. **Фангер П.О.** Качество внутреннего воздуха в XXI веке: влияние на комфорт, производительность и здоровье людей // АВОК. – 2003. – № 4. – С. 12 – 21.
4. **Бухмиров В.В.** Оценка микроклимата в помещениях жилых, общественных и административных зданий / В.В. Бухмиров, М.В. Пророкова // Вестник ИГЭУ, 2015, № 4. – С. 5 – 10.
5. **Bukhmirov V.V.** Simulation of room climate of public buildings / V.V. Bukhmirov, M.V. Prorokova // MATEC Web of Conferences. – 72. – HMTTSC-2016. – P. 1 – 3.
6. **Юн А.А.** Расчет и моделирование турбулентных течений: учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2007. – 116 с.

УДК 621.313.333

И.А. СКВОРЦОВ, магистр,
О.В. САМЫШИНА, ст. преподаватель,
О.Б. КОЛИБАБА, к.т.н., доцент,
О.И. ГОРИНОВ, к.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Скорость термической переработки органических веществ в процессе окислительного пиролиза

Аннотация. Получено выражение удельной производительности терморектора в квазистационарном режиме при разложении органических веществ.

Ключевые слова: органические вещества, скорость термической переработки, полуграниченное тело,

I.A. SKVORTSOV, postgraduate student,
O.V. SAMYSHINA, senior lecturer,
O.B.KOLIBABA, candidate of engineering, assistant professor,
O.I. GORINOV candidate of engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

The rate of thermal processing of organic substances in the process of oxidative pyrolysis

Abstract. The expression for the specific productivity of the thermoreactor in the quasistationary regime is obtained for the decomposition of organic substances.

Key words: Organic substances, rate of thermal processing, semi-limited body.

Термическая переработка органических веществ процессами пиролиза и газификации осуществляются с целью уничтожения различного рода органических отходов, в том числе и бытовых, и-или производства газообразного топлива [1].

Поскольку органические отходы по своей структуре в основном представляют собой порозные вещества, в порах которых содержится воздух, то в процессе термической переработки кислород воздуха окисляет часть органики в ходе экзотермических реакций, то есть имеет место окислительный пиролиз. Проектирование установок по термической переработке органических веществ, в первую очередь, связано с расчетами их удельной производительности или скорости термического разложения, для определения их габаритных размеров.

Нами предложена конструкция и способ уничтожения органосодержащих отходов термическими методами с одновременным производством газообразного топлива теплотворной способностью не ниже 18 мДж/м^3 [2, 3].

Динамическая схема термического разложения органической массы, применительно к предложенной конструкции термореактора, представлена на рис. 1, в которой лучистая тепловая энергия, падающая на поверхность органической массы $q_{\text{пад}}$ будет исходить от излучающей поверхности, имеющей температуру t_u . Принимается, что излучающая и поглощающая поверхности неограниченны и поэтому, систему теплообмена, состоящей из двух параллельных поверхностей, можно считать замкнутой.

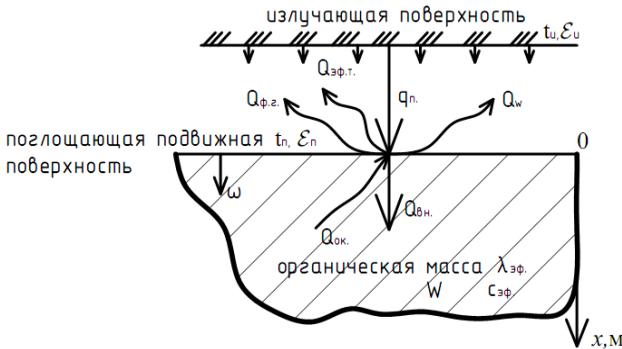


Рис. 1. Динамическая схема распределения энергетических потоков в замкнутой системе теплообмена двух тел

Слой органической массы рассматривается как полуограниченное тело с эффективными теплофизическими коэффициентами $\lambda_{\text{эф}}$ и $C_{\text{эф}}$, учитывающими порозность слоя. W – начальная влажность органической массы. Процесс термической переработки органической массы

сопровождается постоянными температурами излучающей $t_u = const$ и поглощающей поверхности $t_n = const$. Результирующий постоянный лучистый тепловой поток, поступающий на поглощающую поверхность, Вт/м², выразится:

$$q_n = \varepsilon_{пр} \cdot c_0 \left[\left(\frac{T_u}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_n}{100} \right)^4 \right] \quad (1)$$

где $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты; c_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/м²К⁴.

Процесс термической переработки сопровождается переходом органической массы из твердого состояния в газообразные продукты. На этот процесс затрачивается энергия $Q_{эф.м}$ – тепловой эффект термической переработки, Дж/м³ органической массы.

Размер органической массы уменьшается. Процесс уменьшения размера органической массы вследствие пиролиза и газификации аналогичен процессу уменьшения размера тела вследствие фазовых превращений (плавлению). Поэтому поглощающая органической массы поверхность $x=0$ движется вниз с постоянной скоростью ω , с такой же скоростью опускается вниз излучающая поверхность наступает динамическое равновесие. Поступающая лучистая тепловая энергия q_n расходуется так же на сушку и перегрев до температуры t_n влаги Q_w , Дж/м³, на нагрев термогаза $Q_{ф.г.}$ и на нагрев слоя органической массы $Q_{вн.}$, Дж/м³. В результате окислительного пиролиза выделяется энергия $Q_{ок.}$, Дж/м³ органической массы.

Режим теплообмена при изменении размера термообрабатываемого тела в условиях динамического равновесия называется квазистационарным. Можно составить тепловой баланс за время Δt в процессе установившегося (квазистационарного) режима термопереработки полуграниченного слоя органической массы. За время Δt размер слоя уменьшается на величину Δx , а объем его на величину $\Delta x \cdot 1 м^2$.

$$q_n \cdot 1 м^2 \cdot \Delta t + \Delta x \cdot 1 м^2 \cdot Q_{ок} = \Delta x \cdot 1 м^2 \cdot Q_{эф.м} + \Delta x \cdot 1 м^2 \cdot Q_{ф.г.} + \Delta x \cdot 1 м^2 \cdot Q_{вн.} + \Delta x \cdot 1 м^2 \cdot Q_w, \text{ Дж} \quad (2)$$

Удельная объемная (по органической массе) производительность термоперерабатывающей установки терморектора выразиться, м³/с·м²

$$v = \frac{\Delta x \cdot 1 м^2}{\Delta t \cdot 1 м^2} = \frac{q_n}{Q_{эф.м} + Q_{ф.г.} + Q_{вн.} + Q_w - Q_{ок.}} \quad (3)$$

или в весовом отношении:

$$g = v \cdot \rho, \text{ кг/с} \cdot \text{м}^2 \quad (4)$$

где ρ – плотность органической массы, кг/м³.

Выражение (3) по сути является скоростью движения поглощающей поверхности, то есть скоростью термической переработки органической массы в процессе окислительного пиролиза $\omega = v$.

Величина удельной производительности терморектора является важной характеристикой в конструировании различного вида установок термической переработки органической массы, сочетающих в себе полный цикл термических процессов: окислительный пиролиз органической массы; вторичный пиролиз ароматических смол; газификация твердого углеродного остатка (пирокарбона) и горения части термогаза для обеспечения тепловой энергией всей установки.

Литература

1. **Горинов О.И., Колибаба О.Б.** Разработка технологии переработки органического сырья термическими методами / О.И. Горинов, О.Б. Колибаба; ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» – Иваново; 2016. – 116 с.
2. **Патент №2525558** «Способ порционной термической переработки несортированных твердых бытовых отходов на полигоне».
3. **Патент №2536896** «Переносная установка для термической переработки твердых бытовых отходов на полигоне».

УДК 621.69

Р.М. ИСМАИЛОВ, магистр, Д.А. ДОЛИНИН, доцент,
О.И. ГОРИНОВ, к.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Температурное поле в порозном слое органического тела в квазистационарном режиме его термической переработки

Аннотация. Получено выражение для расчета удельного потока тепловой энергии, поступающего на нагрев слоя органической массы в процессе термической переработки.

Ключевые слова: органические вещества, удельный поток, квазистационарный режим

R.M.ISMAILOV, postgraduate student, D.A. DOLININ, senior lecturer,
O.I. GORINOV candidate of engineering, professor
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

The temperature field in the porous layer of the organic body in the quasi-stationary mode of its thermal processing

Abstract. An expression is derived for calculating the specific heat flux entering the heating of the organic mass layer during the thermal processing.

Key words: Organic substances, specific flow, quasi-stationary mode.

При проектировании установок термической переработки органосодержащих отходов, необходимо определять их конструктивные параметры, а именно, величины зон пиролиза и газификации[1].

В условиях квазистационарного режима термообработки, когда наступает динамическое равновесие и поверхность органической массы перемещается по направлению вектора падающего теплового потока q_n рис.1 с постоянной скоростью $\omega = \text{const}$ температурная кривая $t(x)$ не изменяет своей конфигурации, а перемещается во внутрь слоя с той же постоянной скоростью ω .

В квазистационарном режиме термообработки величина зон пиролиза и газификации можно определить по температурному полю полуограниченного тела, что по сути дела является слоем органической массы.

Температурное поле в полуограниченном слое органической массы можно определить решением основного одномерного дифференциального уравнения с постоянными теплофизическими коэффициентами.

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_{эф} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где $a_{эф}$ – эффективный коэффициент температуропроводности порозного тела, m^2/c .

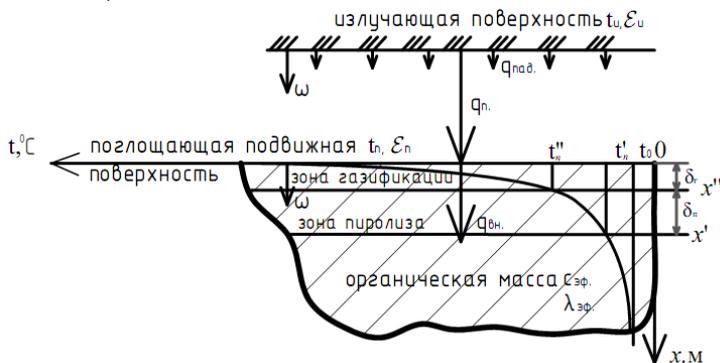


Рис. 1. Температурное поле в порозном слое термически перерабатываемой органической массы в квазистационарном режиме

При постоянной скорости перемещения поверхности органической массы аргументы температурного поля время τ и координата x жестко связаны между собой соотношением:

$$\omega = - \frac{\partial x}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где знак (-) указывает на то, что функция $x(\tau)$ убывающая.

С учетом (2) дифференциальное уравнение (1) можно записать в полных производных:

$$-\frac{\partial t}{\partial x} \omega = a_{эф} \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (3)$$

и решить его при краевых условиях: $x=0, t=t_0, x=l, t=t_n$.

Решением уравнения (3) будет выражение:

$$\frac{t(x) - t_0}{t_n - t_0} = \exp\left(-\frac{\omega}{a_{эф}} \cdot x\right) \quad (5)$$

Температурное поле по сечению слоя органического материала изменяется по экспоненциальному закону (рис. 1).

Если температурный интервал, в котором идет процесс пиролиза ограничен t'_n – начала пиролиза и t''_n – конец пиролиза, то из выражения (5) определяется величина зоны пиролиза:

$$\delta_n = x' - x'' = \frac{a_{эф}}{\omega} \ln\left(\frac{t'_n - t_0}{t''_n - t_0}\right) \quad (6)$$

и величина зоны газификации:

$$\delta_n = x' = \frac{a_{эф}}{\omega} \ln\left(\frac{t_n - t_0}{t'_n - t_0}\right), \quad (7)$$

Из (5) выражается удельный поток тепловой энергии, поступающей на нагрев слоя органической массы.

$$q_{вн} = \lambda \frac{dt(x)}{dx} \Big|_{x=0} = \lambda_{эф} \frac{\omega}{a_{эф}} (t_n - t_0) = \omega \cdot c_{эф} (t_n - t_0), \quad (8)$$

где $\lambda_{эф}$ и $c_{эф}$ – эффективные коэффициенты соответственно теплопроводности и удельной теплоемкости слоя органической массы, учитывающие порозность слоя.

Литература

1. **Горинов О. И., Колибаба О.Б.** Разработка технологии переработки органического сырья термическими методами / О.И. Горинов, О.Б. Колибаба; ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» – Иваново; 2016. – 116 с.

УДК 621.313.333

В.А. АРТЕМЬЕВА, магистр,
Р.Н. ГАБИТОВ, ст. преподаватель,
О.Б. КОЛИБАБА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Экспериментальное исследование продуктов термического разложения твердых бытовых отходов

Аннотация. Проведен масс-спектрометрический анализ продуктов термического разложения смеси твердых бытовых отходов (ТБО) среднего морфологического состава в целях разработки способов повышения эффективности ее энергетического использования в термических реакторах.

Ключевые слова: ТБО, массспектрометрический анализ, окислительный пиролиз, теплотворная способность, ионный ток.

V.A. ARTEM'EVA, postgraduate student,
R.N. GABITOV, senior lecturer,
O.B. KOLIBABA, candidate of engineering, assistant professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Experimental study of the products of thermal decomposition of municipal solid waste

Abstract. Mass spectrometric analysis of thermal decomposition products of a mixture of solid domestic wastes (SDW) of an average morphological composition was carried out to develop methods for increasing the efficiency of its energy use in thermal reactors.

Key words: solid waste, mass spectrometric analysis, oxidative pyrolysis, calorific value, ion current.

Проблема переработки твердых бытовых отходов (ТБО) является актуальной из-за необходимости сокращения объемов захоронения отходов на полигонах ввиду недостатка земельных площадей, транспортных расходов, экологической опасности. Для утилизации и обезвреживания ТБО используют различные методы, наиболее распространенными из которых являются термические [1]. В настоящее время значительный интерес представляет пиролиз. Пиролиз как технология сравнительно молодой способ обращения с органическими отходами.

Термическое разложение ТБО сопровождается образованием пиролизного газа, который можно использовать в установках. Для определения конструктивных особенностей газоиспользующих установок

необходимо знание состава используемого газа и его теплотворной способности.

Качественный состав продуктов пиролиза был определен квадрупольным масс-спектрометром QMS 403C Aëolos путем нахождения парциального давления отдельных компонентов газовой смеси. Разделение смеси по компонентам производили посредством ее ионизация током. Пучок ионов газа при помощи электрического поля разгоняется до высокой скорости и проходит через квадрупольный анализатор масс, состоящий из четырех металлических стержней, к которым приложено напряжение таким образом, чтобы в каждый момент времени через анализатор пролетали ионы только с одним соотношением массы к заряду – M/z . Развертка (R) масс-спектра производится путем изменения постоянного и переменного напряжения или частоты. Для современных квадрупольных масс-спектрометров $R = 8000$. Процесс сбора и обработки данных был автоматизирован при помощи программного обеспечения прибора NETZSCH Proteus Thermal Analysis.

Качественный состав пиролизного газа получен в результате обработки сигналов масс-спектрометра (зависимости ионного тока от температуры), распределенных по массовым числам (рис.1). На рис.1 приведены результаты измерений в процессе пиролиза ТБО в атмосфере с содержанием кислорода 1%. Аналогичные эксперименты были выполнены для пиролиза ТБО в атмосфере с содержанием кислорода 10%.

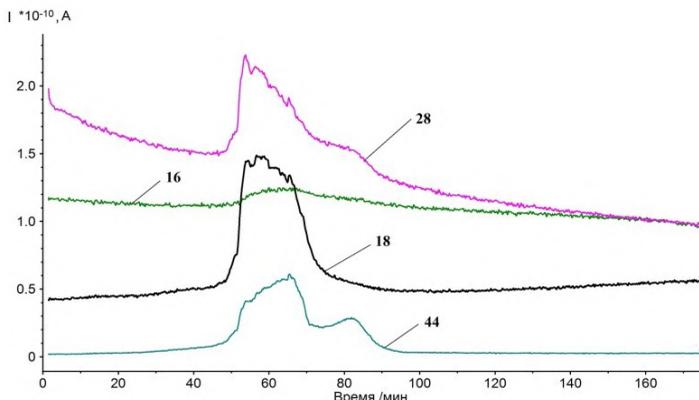


Рис. 1. Масс-спектр газа, образовавшегося при пиролизе ТБО в атмосфере с содержанием кислорода 1%

Для идентификации компонентов пиролизного газа нами были использованы базы данных масс-спектрометров NIST[2], содержащие информацию о масс-спектрах веществ.

Из анализа рис. 1 видно, что основными компонентами пиролизного газа являются: H_2 (2), CH_4 (16), H_2O (18), CO (28), CO_2 (44). Вклад других компонентов с массовыми числами 12, 13, 14, 15, 17 и 46 в массо-

вую составляющую основных компонентов определен сопоставлением с результатами, представленными в базах данных масс-спектрометров NIST.

Количественный состав пиролизного газа определен по методу внутреннего стандарта [3], согласно которому интенсивности сигналов анализируемых соединений сравниваются с сигналом стандартного вещества (калибровочного газа), а для расчета массовых долей компонентов пиролизного газа была использована методика, предложенная Козловым А.Н. и Кейко А.В. [4].

В табл. 1 приведены данные о качественном и количественном составе газа, выделившегося в процессе окислительного пиролиза с содержанием кислорода в атмосфере 1% и 10%.

Таблица 1. Массовые доли основных компонентов пиролизного газа, в %

Содержание O ₂	CH ₄		CO		H ₂ O		CO ₂		H ₂	
	1%	10%	1%	10%	1%	10%	1%	10%	1%	10%
Смесь ТБО	24,1	12	41,2	32,9	18,2	26,6	16,2	28,4	0,12	0,03
Бумага	21,7	11	52,5	44,5	12,8	19,6	12,9	24,7	0,06	0,02
Картофель	27,9	14	30,5	22,5	22,3	32,3	19,1	31,0	0,07	0,03
Ткань	16,2	7,2	41,8	35,8	20,5	26,9	20,4	29,9	0,18	0,06
Полиэтилен	21,8	9,3	45,0	29,9	20,2	29,7	12,7	30,9	0,07	0,01

Расчет теплотворной способности пиролизного газа выполнен по принципу аддитивности:

$$Q_H^p = \sum_{i=1}^n Q_{CH_4} \cdot g_{CH_4} + Q_{CO} \cdot g_{CO} + Q_{H_2} \cdot g_{H_2} \quad (1)$$

где Q_{CH_4} , Q_{CO} , Q_{H_2} – низшая теплота сгорания метана, монооксида углерода и водорода соответственно, Дж/кг; g_{CH_4} , g_{CO} , g_{H_2} – массовые доли метана, монооксида углерода и водорода соответственно.

Для окислительного пиролиза ТБО в атмосфере с содержанием кислорода 1% характерно высокое содержание монооксида углерода (до 42% по массе). При этом теплотворная способность пиролизного газа составила 17,7 МДж/кг и тепловыделение (эффект пиролиза) 4,25 МДж/кг. При окислительном пиролизе ТБО в атмосфере с содержанием кислорода 10% теплотворная способность пиролизного газа составила 10 МДж/кг и тепловыделение 6,7 МДж/кг.

Литература

1. **Basu P.** Biomass gasification and pyrolysis. Practical design and Theory – Published by Elsevier. 2010. – 365 p.
2. **Открытая** база данных масс-спектров NIST. <http://webbook.nist.gov/chemistry/>

3. Лебедев А. Т. Масс-спектрометрия органической химии. – М.: БИНОМ., 2003. – 493 с.
4. Kozlov A.N., Svishchev D.A., Donskoi I.G., Keiko A.V. Thermal analysis in numerical thermodynamic modeling of solid fuel conversion// Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2012. V. 109. No. 3. P. 1311–1317.

УДК 669.162.252

Е.С. ШУВЬЕ, студент,
Д.А. ДОЛИНИН, доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Исследование работы мокрого скруббера на основе математического моделирования

Аннотация: разработана математическая модель скруббера, которая позволяет получать наглядные картины распределения скоростей, температур и давлений, проводить эксперименты при различных режимах работы форсунок и различных параметрах доменного газа.

Ключевые слова: доменный газ, мокрая очистка, скруббер, форсунка, эффективность.

E.S. SHUVIE student,
D.A. DOLININ assistant professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

The study of wet scrubber on the basis of mathematical modeling

Abstract: a mathematical scrubber model, which gives the possibility to get graphics pictures of speed, temperature and pressure distribution, conduct experiments with various nozzles operating modes and various initial furnace gas parameters, was created.

Key words: furnace gas, scrubber, wet gas cleaning, centrifugal atomizer, efficiency.

На металлургических предприятиях очистка газа после доменных печей от пыли производится последовательно в трёх ступенях:

- грубая очистка газа в сухих инерционных пылеуловителях;
- полутонкая очистка газа в скрубберах;
- тонкая очистка газа в трубах Вентури и дроссельных группах.

Наиболее энергоёмким оборудованием являются полый форсуночный скруббер и трубы Вентури. Их эксплуатация связана с высокими

затратами воды, поэтому снижение расхода оборотной воды на газоочистку является актуальной задачей. Вместе с тем, эффективность работы газоочистительного оборудования зависит от качества и количества используемой воды.

Основным звеном газовой очистки является мокрый скруббер. Улавливание пыли в скруббере осуществляется за счет капель воды, образованных посредством форсунок.

Доменный газ после сухого пылеуловителя подается в скруббер через наклонный патрубок, расположенный в нижней части аппарата. При этом запыленный газ направляется на зеркало воды для осаждения наиболее крупных частиц пыли. Затем, распределяясь по всему сечению скруббера, газ движется вверх навстречу потоку капель воды.

На работу скруббера влияет много факторов, что затрудняет полное описание модели процесса и проведение расчетов. Для диспергируемой фазы такими факторами являются: неоднородность капель факела по величине поверхности, массы и веса; подверженность крупных капель деформации и распаду; взаимное слияние и раздробление части капель смежных факелов; изменение плотности всего распыленного потока по высоте вследствие гравитационного оседания капель.

Для газовой среды характерно влияние следующих факторов: неравномерные условия обтекания газом капель полидисперсного состава; унос газом части капель; совместное влияние скорости и направления газового потока на факелы разбрызгивания, а также эффект продольного и поперечного перемешивания газа.

Среди указанных факторов наиболее важными и поддающимися непосредственному воздействию являются дисперсность распыла и скорость газового потока. Дисперсность распыла является управляемой величиной и зависит от режима работы (расхода и давления воды). Скорость газового потока зависит от расхода газа, и для рассматриваемого случая определяется режимом работы доменной печи.

Для исследования влияния указанных факторов наиболее подходит программный комплекс Fluent, который предназначен для моделирования трехмерных течений жидкости и газа в технических и природных объектах, а также визуализации этих течений методами компьютерной графики.

Для экономии ресурсов при решении поставленной задачи были приняты следующие допущения:

- решается стационарная задача;
- вода внизу скруббера рассматривается как неподвижная, несжимаемая жидкость;
- газ рассматривается как идеальный сжимаемый газ;
- влияние стенок скруббера на движение газа не учитывается.

Построение расчетной сетки производилось в модуле Meshing. Дальнейшие расчеты велись в ANSYS FLUENT на расчётной сетке количеством 4,7 млн. элементов.

Для каждой форсунки задавались следующие характеристики:

- положение (координаты x , y , и z в прямоугольной системе отсчёта);
- компоненту направляющего вектора (для нижнего и среднего яруса направление сонаправленно с осью OY , а для верхнего противоположно);
- температура воды 300 К;
- массовый расход воды на каждую форсунку составляет 15,43 кг/с;
- угол распыла форсунки 30° ;
- давление 506625 Па.

Скорость газа в скруббере принимают равной 0,8–1,5 м/с, так как при больших скоростях начинается капельный унос влаги, что способствует образованию отложений на входном патрубке скруббера и в газопроводах. Удельный расход воды на скруббер составляет 3–6 л/м³ газа. Гидравлическое сопротивление полых скрубберов не превышает 250 Па [2].

Для доменного газа на входе задавалась температура 473 К, давление 0,2 МПа и расход 400000 м³/ч.

Построена математическая модель для исследования движения газа в скруббере. На рис. 1 приведены распределения давления и скорости по сечению скруббера.

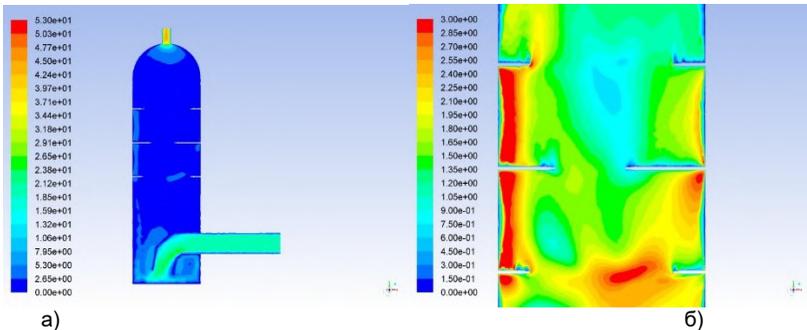


Рис. 1. Распределение по сечению скруббера:
а) давления потока газа; б) скорости потока газа

Полученная математическая модель позволяет получать адекватные данные о процессах, происходящих в скруббере, находить оптимальный режим работы, рассматривать работу скруббера при различном сочетании работающих форсунок. Предложенный способ расчёта можно использовать на начальном этапе проектирования.

Литература

1. **Старк С.Б.** Газоочистительные аппараты и установки в металлургическом производстве: Учебник для вузов / С.Б. Старк. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1990. С. 94.
2. **Швыдкий В.С.**, Ладыгичев М.Г. Очистка газов: Справочное издание / В.С. Швыдкий, М.Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. С. 370.
3. **Головачевский, Ю.А.** Оросители и форсунки скрубберов химической промышленности / Ю.А. Головачевский. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1974.

УДК 621.6.029

Д.А. ДОЛИНИН, доцент,
О.Б. КОЛИБАБА, к.т.н., доцент, А.С. СЕМЕНОВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Перспективы применения фрактальной геометрии для математического моделирования гидродинамики слоя твердых бытовых отходов

Аннотация: в работе предложено использовать фрактальную структуру «губку Менгера» в качестве геометрической модели пористого тела, представляющего собой слой твердых бытовых отходов. Для предложенной геометрической структуры создана и численно реализована математическая модель гидродинамики в слое твердых бытовых отходов. Модель позволяет исследовать гидравлические режимы работы печи.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы; фрактал; геометрическая модель; губка Менгера; математическая модель.

D.A. DOLININ, assistant professor,
O.B. KOLIBABA PhD, assistant professor, A.S. Semenov student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Prospects for applying fractal geometry for mathematical simulation of the hydrodynamics of a layer of solid domestic waste

Abstract. The paper proposed to use fractal structure "Menger sponge" as a geometric model of a porous body, which is a solid waste layer. For the proposed geometric structure created and numerically implemented mathematical model of hydrodynamics in a solid waste layer. The model allows us to investigate hydraulic furnace operation modes.

Key words: municipal solid waste; fractal; geometrical model; Menger sponge; mathematical model.

Жизненная деятельность человека связана с появлением большого количества различных отходов, в том числе, твердых бытовых, которые являются источниками поступления биологических, химических и биохимических соединений в природную среду.

ТБО представляют собой гетерогенную смесь сложного морфологического состава, включающую: бумагу, текстиль, пластмассы, пищевые и растительные компоненты, камни, кости, кожу, резину, дерево, черные и цветные металлы, стекло [1].

Наиболее перспективными технологиями утилизации отходов являются термические методы, включающие пиролиз и газификацию. Термическая переработка сырья позволяет получить не только горючий газ, но и решить экологическую проблему, связанную с загрязнением городов и рекультивацией земель. Процесс термической переработки ТБО чаще всего осуществляется в печах шахтного типа. Твердые бытовые отходы загружаются в верхнюю часть печи и последовательно проходят зоны сушки, пиролиза и газификации. В зоне сушки осуществляется нагрев и сушка слоя ТБО за счет теплообмена с потоком газа из зоны пиролиза, а выделившаяся в процессе влага совместно с легкими летучими соединениями поступает на газификацию твердого углеродистого остатка. В зоне пиролиза горючие составляющие ТБО пиролизуются, образуя пиролизный газ и твердый углеродистый остаток, который постепенно опускается в зону газификации. Туда же направляется газообразный окислитель. Образующийся в результате газификации топливный газ в смеси с пиролизным газом является качественным топливом.

Для организации рационального режима работы печи необходимо, кроме тепловой задачи (определение температурных полей слоя ТБО), решать и гидродинамическую (определение полей скоростей и давлений в слое). Решение этих задач напрямую связано с моделированием геометрии слоя ТБО, представляющим собой многокомпонентное пористое тело.

На базе современных пакетов прикладных программ предлагается использовать фрактальный подход [2], который позволяет унифицировать внутреннюю геометрию слоя ТБО. В основу 3-D модели положена фрактальная структура – «губка Менгера» (рис. 1).

Геометрическая модель пористого тела на основе фрактала «губка Менгера» построена в среде SolidWorks с последующим импортированием в программный комплекс ANSYS.

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления слоя ТБО в про-

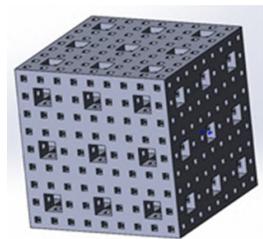


Рис. 1. Геометрическая модель слоя ТБО

цессе его сушки было проведено экспериментальное исследование на лабораторном стенде ЭЛБ-С-1.

При определенной высоте слоя и порозности твердых бытовых отходов в зависимости от скорости воздуха производились измерения перепадов давления.

Результаты измерений представлены в табл. 1.

Таблица 1. **Результаты измерений**

Н, м	0,08				
Порозность	0,606				
m, кг	0,19				
V, м/с	2,1	2,3	2,5	2,7	3
Δp , Па	117,72	147,15	166,77	196,2	225,63

Численная реализация математической модели гидродинамики в слое ТБО осуществлена в ПК ANSYS-Fluent. В результате получены поля скоростей и давлений при различных гидравлических режимах (табл. 2).

Таблица 2. **Результаты расчётов**

Н, м	0,08				
Порозность	0,58				
V, м/с	2,1	2,3	2,5	2,7	3
Δp , Па	117,72	147,15	166,77	196,2	225,63

Верификация модели произведена сравнением результатов расчета с данными лабораторного эксперимента, в ходе которого фиксировался перепад давлений в слое ТБО с заданной порозностью при различных скоростях движения теплоносителя (рис. 2.)

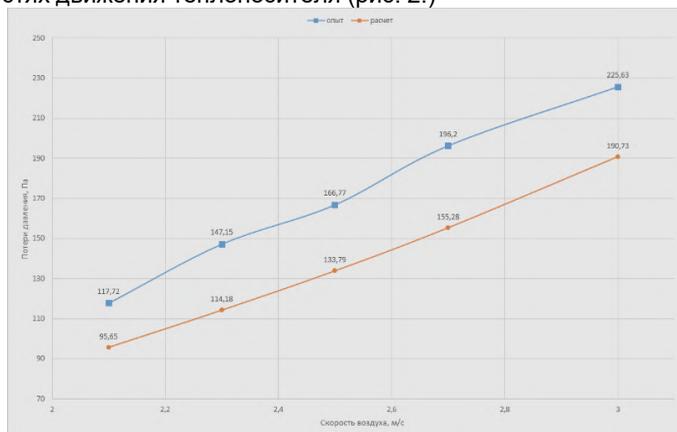


Рис. 2. Сравнение экспериментальной и расчетной зависимости перепада давления от скорости воздуха, проходящего через слой ТБО

Сравнив экспериментальную и расчетную зависимость, была выявлена похожая тенденция роста.

Выводы:

1. Предложена геометрическая модель пористого тела на основе фрактала «губка Менгера», позволяющая унифицировать внутреннюю геометрию слоя ТБО.

2. Разработана и численно реализована математическая модель гидродинамики в слое ТБО, позволяющая исследовать гидравлические режимы работы печи для переработки отходов.

Литература

1. **Калинин В.И.** Термическая утилизация твердых бытовых отходов Электронный ресурс. // Концепция НИИ Стромкомпозит – 2006. – URL: <http://www.Stromkomposit.ru/42/html>.
2. **Смирнов Б.М.** Физика фрактальных кластеров. – М.: Наука, 1991. – 136 с.

УДК 621.313.333

Т.В. МУРАТОВА, магистрант,
Р.Н. ГАБИТОВ, ст. преподаватель,
О.Б. КОЛИБАБА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

**Расчетно-экспериментальное исследование процесса сушки
твердых бытовых отходов**

Аннотация. Предложена математическая модель тепломассопереноса в слое ТБО, которая позволяет исследовать процесс его сушки. Модель позволяет рассчитать температурные поля в слое ТБО в процессе его сушки с учетом распределенного внутреннего стока теплоты. Предложенная модель может быть применена в расчетах при проектировании термических реакторов для переработки многокомпонентных органических отходов.

Ключевые слова: сушка, твердые бытовые отходы, теплообмен, температурное поле, математическая модель, эффективные теплофизические коэффициенты.

T.V. MURATOVA, postgraduate student,
R.N. GABITOV, senior lecturer,
O.B. KOLIBABA, candidate of engineering, assistant professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Computational and experimental research of the drying process of municipal solid waste

Abstract. The mathematical model heat and mass transfer in a layer of solid waste, which allows you to explore the process of drying. The model allows the calculation of temperature fields in the layer of solid waste in the process of drying, taking into account the distributed internal heat sink. The proposed model can be applied in the calculations for the design of the thermal reactor for processing multicomponent organic waste.

Key words: drying, municipal solid waste, heat transfer, temperature field, mathematical model, effective thermal coefficients.

Целью работы является создание математической модели теплообмена в процессе сушки слоя ТБО, ее реализация в программном комплексе ANSYS (рис.1) и проверка адекватности модели.

Слой ТБО представляет собой пористую структуру, которую предлагается заменить ее моделью – условным квазиоднородным изотропным пористым телом с усредненными величинами порозности, температуры, давления и т. д.

Температурное поле слоя ТБО описывается дифференциальным уравнением теплопроводности с эффективными теплофизическими свойствами и внутренним стоком теплоты в совокупности с уравнением граничных условий III рода. Начальная температура слоя ТБО равна температуре окружающей среды.

В качестве модели твердого «скелета» принята модель многокомпонентной смеси с вкраплениями [1]. Эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}$ рассчитывается по формуле Л.А. Бровкина [2].

Закон изменения внутреннего стока теплоты определяется на основе экспериментальных данных решением обратной задачи теплопроводности.

Математическая модель теплообмена в процессе сушки слоя ТБО реализована в программном комплексе ANSYS [3,4]. Адекватность модели проверена путем сопоставления результатов моделирования с аналитическим решением и экспериментальными данными.

Точное аналитическое решение задачи тепломассобмена, основанное на преобразованиях Лапласа, предложено С. В. Федосовым [5].

На рис. 2 приведены температурные поля слоя ТБО, полученные экспериментально, на основе точного аналитического решения и математическим моделированием.

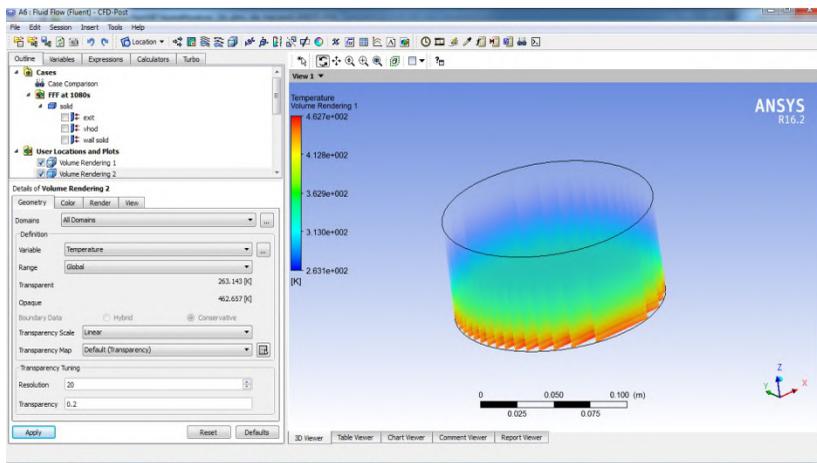


Рис. 1. Распределение температур по слою ТБО за все время нагрева

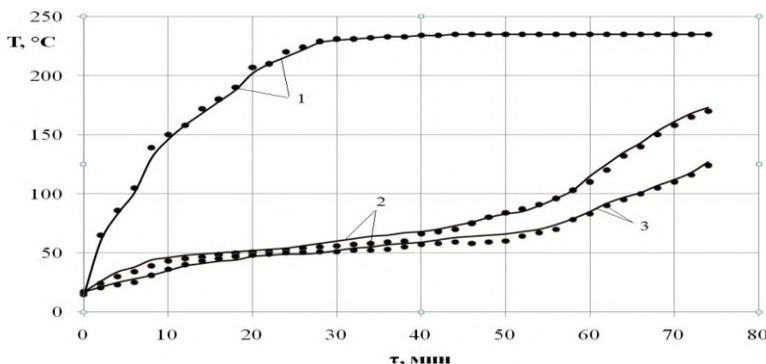


Рис. 2. Температурные поля слоя ТБО: 1– температура на поверхности слоя ТБО; 2– температура на расстоянии от поверхности 55 мм и 3 – температура центра. — расчет по предложенной методике; ●●● эксперимент

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показало, что погрешность не превышает $\pm 12\%$.

Литература

1. Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
2. Бровкин Л.А. Температурные поля тело при нагреве и плавлении в промышленных печах. – Иваново: ИЭИ, 1973. – 364 с.
3. Брюяка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. Инженерный анализ в ANSYSWorkbench: учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 149 с.

4. **Басов К.А.** Графический интерфейс комплекса ANSYS. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 248 с.

5. **Федосов С. В.** Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии: монография / С.В. Федосов. - Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. – 364 с.

УДК 621.438

А.А. ПАВЛОВ, студент, О.Ю. НАГОРНАЯ, ст. преп.,
В.А. ГОРБУНОВ, д.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: al.pavl95@mail.ru, olnagornaya@yandex.ru, gorbunov.w@mail.ru

Детерминированная модель работы газовой утилизационной бескомпрессорной турбины

Аннотация: предложена детерминированная модель работы ГУБТ-25 на основе численного моделирования, реализованного с помощью программно-вычислительного комплекса ANSYS CFX с целью расширения диапазона значений параметров, влияющих на эффективность работы турбины.

Ключевые слова: газовая утилизационная бескомпрессорная турбина, детерминированная модель.

A.A. PAVLOV student,
O.Yu. NAGORNAYA senior teacher,
V.A. GORBUNOV Doctor of Engineering docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: al.pavl95@mail.ru, olnagornaya@yandex.ru, gorbunov.w@mail.ru

Deterministic model of the gas utilization of the compressorless turbine

Abstract. A deterministic model of the work of the GUBT-25 based on numerical simulation implemented with the help of the ANSYS CFX software complex with the purpose of expanding the range of values of the parameters influencing the efficiency of the turbine operation.

Key words: gas utilization of the compressorless turbine, deterministic model.

Сегодня на металлургических комбинатах и других промышленных предприятиях применяются газовые утилизационные бескомпрессорные турбины (ГУБТ), использующие избыточное давление колошникового газа доменных печей. Выпуск таких машин позволяет металлургам не только получить дополнительную электроэнергию, но и значительно улучшить экологическую обстановку в крупных промышленных регионах.

Эффективность работы ГУБТ во многом зависит от работы доменной печи. Основными параметрами доменного газа, которые в значи-

тельной степени влияют на увеличение выработки электрической энергии являются расход доменного газа, давление и температура доменного газа до и после турбины.

В настоящее время разработана нейросетевая модель работы ГУБТ-25, которая позволила получить технически-обоснованные нормы расхода энергии доменного газа и режимные карты работы турбины в диапазоне экспериментальных данных [1,2].

С целью расширения диапазона значений параметров, влияющих на эффективность работы ГУБТ-25 разрабатывается детерминированная модель гидродинамической работы турбины на основе численного моделирования с использованием программно-вычислительного комплекса ANSYS CFX [4].

ГУБТ-25 предназначена для привода электрогенератора с частотой вращения 1500 об/мин. Турбина четырехступенчатая, двухпоточная. Турбина работает на влажном доменном газе и использует потенциальную энергию доменного газа с абсолютным давлением примерно 305 кПа. Особенности профилей направляющих лопаток проточной части турбины обусловлены неосевым входом потока, а также тем обстоятельством, что эти лопатки регулируют расход доменного газа изменением проходных сечений за счет поворота. С учетом этих особенностей расчетный угол натекания составляет 120°. Это сделано для того, чтобы на минимальных режимах, где первая ступень работает с максимальным перепадом давлений, угол натекания потока был оптимальным, что обеспечит наиболее благоприятную эпюру скоростей по профилю лопатки и, следовательно, наименьшие потери на направляющих лопатках. Так как профили направляющих лопаток 2-4 ступеней работают в условиях осевого входа потока, то они унифицированы. Ввиду того, что условия работы рабочих лопаток 2-4 ступеней более благоприятны по углам натекания, чем для первой ступени, поэтому профили рабочих лопаток для второй и третьей ступени также унифицированы и получены из рабочих лопаток четвертой ступени путем подрезки сверху

На первоначальном этапе создания модели принимается ряд допущений.

1. Свойства рабочего тела (доменного газа) турбины во всех точках процесса расширения считаются аналогичными свойствам смеси идеальных газов.

2. Так как рабочее вещество подчиняется законам идеального газа, то в процессе расширения не учитывается выпадение капельной влаги и, как следствие, выделение скрытой теплоты парообразования.

3. Поскольку проточная часть турбины ГУБТ-25 симметрична, то расчет выполняется для правой стороны (рис. 1,2).

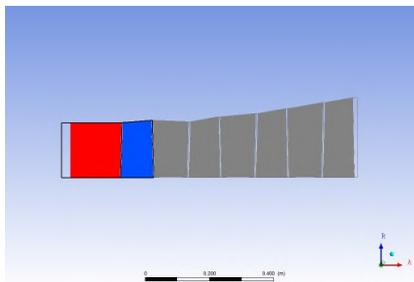


Рис. 1. Твёрдотельная модель проточной части турбины

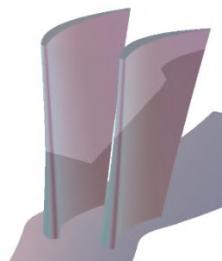


Рис. 2. Твёрдотельная модель рабочих лопаток четвертой ступени

4. Расчет выполняется в стационарном режиме итерационно при условии, что частота вращения ротора турбины составляет 1500 об/мин.

5. В процессе расширения не учитывается свободная капельная влага, впрыскиваемая в турбину.

6. Зазор между решетками принимается равным $\Delta=8$ мм.

7. Не учитываются перетекания в зазорах.

При соблюдении вышеуказанных допущений модель позволяет получить результаты, рекомендованные [3] и оценить зависимость показателей работы турбины от входных параметров в различных пределах их изменения (рис. 3÷4).

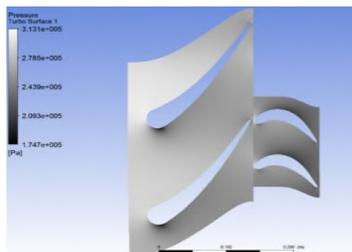


Рис. 3. Распределение давления в первой ступени турбины

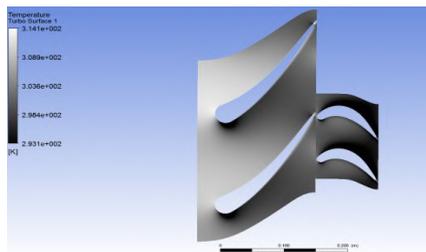


Рис. 4. Распределение температуры в первой ступени турбины

В дальнейшем предполагается модель доработать путем приближения свойств рабочего тела к реальным и учесть конденсацию водяных паров, содержащихся в газе при его охлаждении.

Таким образом, созданная модель позволит оценить направления повышения эффективности турбины.

Литература

1. **Горинов О.И., Горбунов В.А., Нагорная О.Ю.** Экспериментальное исследование работы ГУБТ-25 на ОАО «Северсталь» / Состояние и перспективы развития электротехнологии. XII Бенардосовские чтения: Тез. докл. международной научно-технической конференции. – Иваново: ГОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина», 2005. Т.2. – С. 54.
2. **Горбунов В.А., Нагорная О.Ю.** Использование нейросетевого подхода для получения режимных карт работы турбины ГУБТ-25 / Вестник ИГЭУ. – 2006. – № 4. С. 64-66
3. **Сазанов Б.В.** Доменные газотурбинные установки. – М.: Metallurgy. – 1965. – 266с.
4. **Исследование** рабочего процесса в ступени осевой турбины с помощью универсального программного комплекса ANSYS CFX: метод. указания / сост. О.В. Батурин, Д.А. Колмакова, В.Н. Матвеев, Г.М. Попов, Л.С. Шаблий – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. – 100 с: ил.

УДК 624.365

Г.А.ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ, аспирант, В.А. ГОРБУНОВ, д.т.н. доцент,
О.Б. КОЛИБАБА, к.т.н., доц., А.Е. ПОТЕХИН, магистрант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: mkandy@mail.ru

Использование фрактальной геометрии для моделирования процессов теплообмена в термической садочной печи

Аннотация. На основе геометрической фрактальной структуры «губка Менгера» разработана математическая модель теплообмена в пористом теле. Модель позволяет рассчитывать температурные поля насыпных садов, нагреваемых в термических печах.

Ключевые слова: теплообмен. Фрактальная структура, пористое тело, насыпная садка, математическая модель.

G.A.PEREVEZENTSEV, post-graduate student,
V.A. GORBUNOV, D.Sc. assistant professor,
O.B. KOLIBABA, Ph.D., Assoc., A.E. POTEKHIN, master student
Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
E-mail: mkandy@mail.ru

Using fractal geometry to simulate the heat transfer in a thermal kettle

Abstract. Based on the geometric fractal structure of the "Menger sponge", a mathematical model of heat transfer in a porous body is created. The model makes it possible to determine the temperature fields of bulk tanks heated in thermal furnaces.

Key words: heat exchange, fractal structure, porous body, bulk cage, mathematical model.

При термообработке мелких изделий их загружают в печь в контейнерах, на поддонах или насыпью на подину печи. Такие садки, являющиеся пористыми телами, называют насыпными садками [1] (рис. 1, а).

В расчете процессов теплообмена в пористом теле, как правило, его заменяют условным квазиднородным телом с эффективными теплофизическими свойствами, определение которых вызывает существенные трудности [2].

Альтернативным вариантом такому подходу является рассмотрение теплообмена отдельно для твердой и газовой фаз.

Современные программные комплексы позволяют производить расчет теплообмена в пористых телах достаточно сложной структуры. Однако основная трудность заключается в точном воспроизведении неоднородности структуры геометрической модели при ее построении в САЕ-пакете.

Для унификации геометрии насыпных садок предлагается использовать модель, построенную на основе фрактальной структуры «губка Менгера».

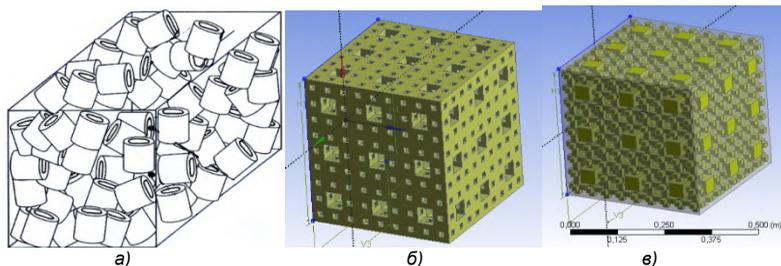


Рис. 1. Контейнер с насыпной садкой (а) и его фрактальная модель, б) твердое тело, в) газовое тело

В последнее время при проведении математического моделирования физических процессов возросло внимание к концепции построения фрактальных моделей. Эффективность применения данной концепции заключается в том, что подобные модели позволяют не только отражать физические явления в пористых структурах, но и включать фрактальные параметры в дифференциальные уравнения, описывающие исследуемое физическое явление.

Математическая модель, построенная на основе фрактальной структуры «губка Менгера», при бесконечном числе итераций имеет нулевой объем и бесконечную площадь поверхности, что позволяет исследовать тела, пористость которых изменяется в пределах от 0,2 до 1.

Математическая формулировка задачи представлена системой дифференциальных уравнений энергии, неразрывности и движения для газовой среды и уравнения энергии для твердого «скелета».

Для проведения расчетного эксперимента в ПК ANSYS построена трехмерная геометрическая модель насыпной садки, состоящая из двух тел: твердого «скелета» (рис. 1, б) и газового тела (рис. 1, в).

Схема нагрева пористого тела показана на рис. 2.

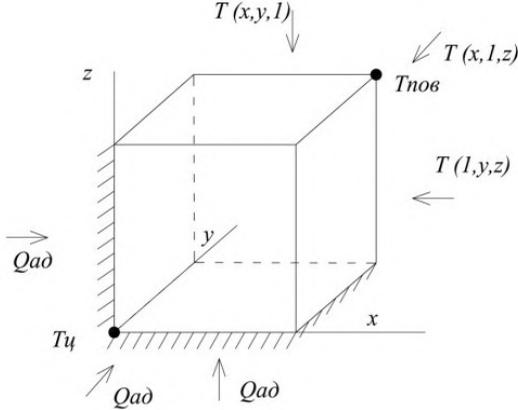


Рис. 2. Схема нагреваемого фрактального тела

На рис. 3 представлены температурные поля фрактальной модели насыпной садки: а – в начальный момент времени, б – в середине нагрева, в – в конце нагрева.

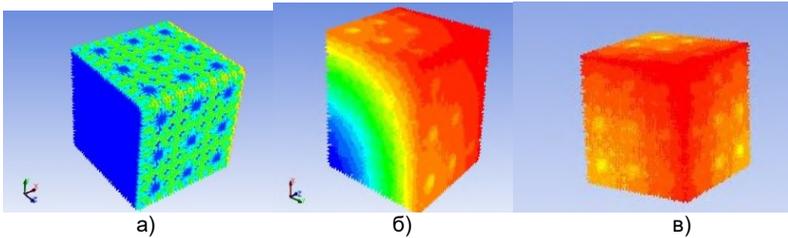


Рис. 3. Температурное поле фрактальной модели:
а – в начальный момент времени, б – в середине нагрева, в – в конце нагрева

Для верификации предложенной модели проведено сравнение результатов моделирования с литературными данными [3, 4], графическая интерпретация которых представлена на рис. 4.

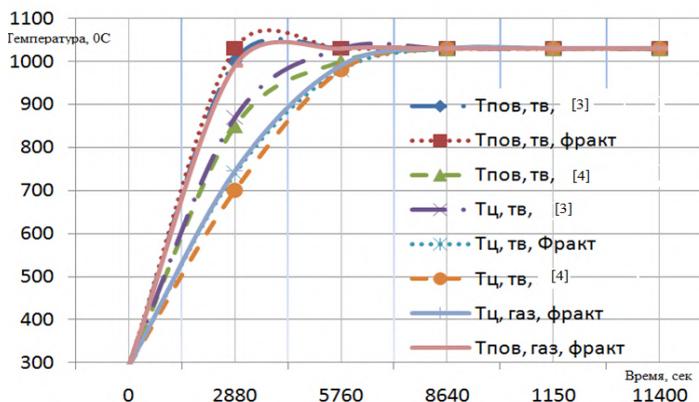


Рис. 4. Температурные поля насыпной садки

Из анализа рис. 4 видно, что имеет место расхождение значений температур на поверхности нагрева, что может быть следствием увеличения влияния радиационных тепловых потоков во фрактальных «порах». Величина отклонения невелика, и составляет порядка 3%.

Вывод: предложенная математическая модель фрактальной структуры пористого тела согласуется с расчетными данными, полученными расчетными методами через эффективные свойства пористых тел.

Литература

1. **Бровкин Л.А.** Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах. Иваново, изд. Ивановского гос. университета, 1973, 364 с.
2. **Васильев Л.Л., Танаева С.А.** Теплофизические свойства пористых материалов. – Минск: Наука и техника, 1971. – 268 с.
3. **Гусенкова Н.П., Крылова Л.С., Коротин А.Н.** Математическое моделирование температурного поля пористого тела с фильтрацией // межвуз. Сб. научн. трудов «Моделирование теплофизических процессов и вопросы энергосбережения в теплотехнологии» / Иваново: Игзу, 2000. – с.13 – 20.
4. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. – М.6 Высшая школа, 1967. – 600 с.

УДК 66.047

В.Ф. НИКИШОВ, к.т.н., доцент,
А.И. СОКОЛЬСКИЙ, д.т.н., профессор
Н.А. МАЛИНИН, магистр

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Термообработка теплоизоляционных стеновых плит «Техфом»

Аннотация: представлены экспериментально-теоретические данные по термообработке теплоизоляционных стеновых плит в туннельной конвективной сушилке.

Ключевые слова: сушка, десорбция, массопроводность, влагосодержание, пористая структура, стеновые плиты.

V.F.NIKISHOV candidate of Engineering, senior lecturer,
A.I.SOKOLSKY Doktor of Engineering, professor,
N.A. MALININ, postgraduate student

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya, 34
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Heat treatment of heat-insulating wall plates «Texfom»

Abstract. The experimental and theoretical data on heat treatment of heat-insulating wall plates in a tunnel convection dryer are presented.

Key words: Drying, desorption, mass conductivity, moisture content, porous structure, wall slabs.

«Техфом» – это инновационный тепло и звукоизоляционный негорючий материал. Основа ТЕХФОМа – жидкое натриевое стекло. Изделия получают холодным вспениванием и формованием при атмосферном давлении. Мелкопористая структура материала обеспечивает низкую теплопроводность изделий, а часть открытых пор легко пропускает пары и значительно снижает уровень шума.

Сушилка представляет собой четыре последовательных туннеля, расположенных в цеху параллельно. В первый туннель поступают плиты размером 3хбх0,3 м с начальным влагосодержанием 0,833 кг/кг. абс. сух. мат. с интервалом 20 минут по мере заполнения форм. При заданной скорости движения транспортёра время пребывания формы в туннеле составляет 100 минут. Длина туннеля 32 метра. Во втором туннеле формы проходят также в один слой горизонтально. В третьем и четвёртом туннелях двигаются платформы с плитами по 5 штук. Общее время пребывания изделий в сушилке составляет 20 часов. Влагосо-

держание плит на выходе должна быть не более 8-10%. Начальная температура теплоносителя 40-50 градусов.

Гетерогенные процессы, протекающие в системах «газ – твердое тело», занимают особое место в технологических процессах. Скорость их протекания определяются закономерностями переноса массы и энергии во взаимодействующих фазах[1].

При разработке технологий и конструкций аппаратов для их проведения в существующей расчетной практике преобладают балансовые методы. Они, безусловно, полезны и нужны, но должны являться составной частью общей методики расчета, включающей модели внутреннего тепломассопереноса в материале, а также моделей, учитывающих межфазное взаимодействие на границе раздела фаз и изменение свойств обрабатываемого материала в процессе сушки.

Как уже указывалось, процесс тепломассопереноса в общем случае характеризуется непостоянством физических параметров: k , U , t , c , a , λ .

Теплоемкость, плотность, теплопроводность рассчитывают по уравнениям аддитивности:

$$C = C_O(1-U) + C_B \cdot U; \quad (1)$$

$$\rho = \rho_O(1-U) + \rho_B \cdot U; \quad (2)$$

$$\lambda = \lambda_O(1-U) + \lambda_B \cdot U; \quad (3)$$

а коэффициент температуропроводности по уравнению:

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho} . \quad (4)$$

Коэффициент массопроводности определяется по методу Ермоленко-Журавлевой. Для этого были проведены экспериментальные исследования: снималась кинетика процесса сушки и температурная кривая, представленные на рис.1.

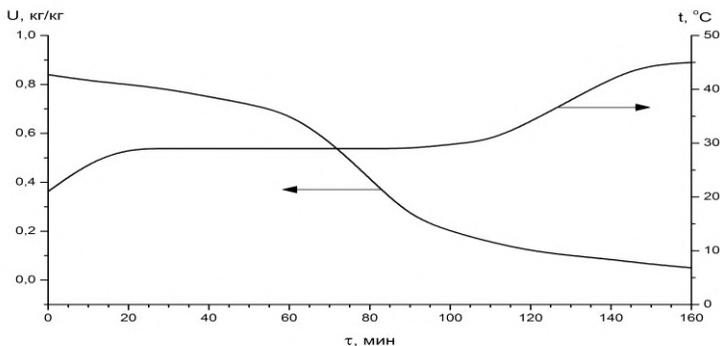


Рис. 1. Кинетика процесса сушки

Ими была предложена формула:

$$k = \frac{1}{6} \cdot \frac{dc}{d\tau} \cdot \frac{R^2 - R_1^2}{c_1(\tau) - c(\tau)} \quad (5)$$

где $2R$ - толщина пластины, м; $C(\tau)$ - среднеобъемная концентрация в момент времени τ ; $C(\tau)$ - среднеобъемная концентрация в центре пластины; $dC/d\tau$ - скорость изменения среднеобъемной концентрации.

Результаты эксперимента представлены на рис. 2.

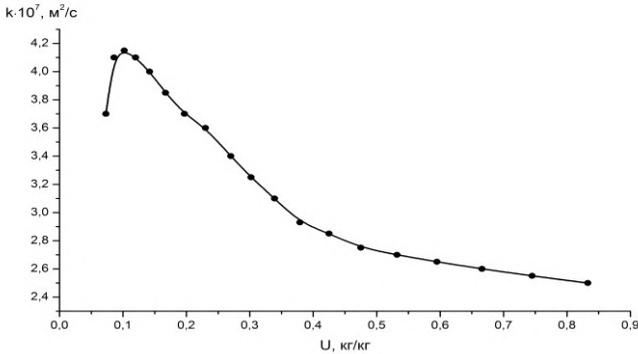


Рис. 2. Зависимость массопроводности от влагосодержания

Расчет конечной влажности изделий по длине каждого туннеля производим по выражению:

$$E = \frac{C(r, \tau) - C_p}{C_H - C_p} = \frac{2}{\mu_M} \cos\left(\mu_M \cdot \frac{r}{R}\right) \cdot \exp(-\mu_M^2 \cdot Fo) \quad (6)$$

Результаты расчета приведены на рис.3.

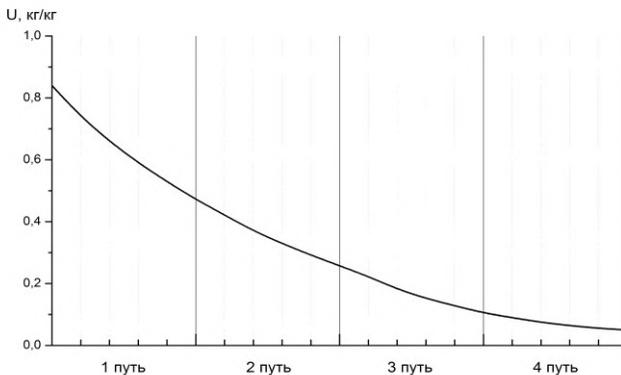


Рис. 3. Распределение влагосодержания по пути движения плит

Отсюда следует, что влагосодержание изделий на выходе из последнего туннеля не превышает заданной величины.

Литература

1. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968, - 471с.

УДК 621.1:667

А.К. ГАСЬКОВ¹, аспирант,
В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: gaskov87@mail.ru

Экспериментальное определение интегральной степени черноты фасада здания

Аннотация: приведены результаты исследования интегральной степени черноты различных строительных материалов и энергосберегающих покрытий применяемых для отделки фасадов зданий в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: интегральная степень черноты, энергосберегающая краска, «мокрый» фасад, цементная штукатурка, силикатный кирпич.

A.K. GASKOV postgraduate student, V.V. BUKHMIROV Doctor of

Engineering, professor
Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: gaskov87@mail.ru

Experimental determination of the integral degree of blackness of the facade of a building

Abstract. The results of the study of the integral degree of blackness of various building materials and energy-saving coatings used for finishing facades of buildings in real operating conditions are given.

Key words: integral degree of blackness, energy-saving paint, "wet" facade, cement plaster, silicate brick.

Снижение тепловых потерь является актуальной задачей повышения энергетической эффективности объектов жилищно-коммунального хозяйства. Для уменьшения потерь тепловой энергии используются различные виды теплоизоляционных материалов и конструкций, которые должны обладать низкой теплопроводностью, малой поглощательной способностью влаги, механической прочностью и рядом других специальных свойств. На рынке теплоизоляционных материалов пред-

ставлен широкий ассортимент продукции, основная доля которых (~97%) приходится на неорганические материалы - минераловатные утеплители и пенопласты [3]. Однако, в настоящее время в целях энергосбережения достаточно широко стали применять тонкоплёночные покрытия, состоящие из полых микросфер, расположенных в связующем материале, которые обладают свойствами красок, но с меньшим значением коэффициента теплопроводности. Производители энергосберегающих красок утверждают, что покрытия подобного вида обладают уникальными теплоотражающими свойствами, которые позволяют снижать тепловые потери в том числе за счёт низкой радиационной составляющей теплоотдачи [1,2].

Целью данной работы является определение интегральной степени черноты различных строительных материалов и энергосберегающих покрытий, применяемых для отделки или утепления фасадов зданий. Для исследования различного рода покрытий в натуральных условиях был создан полномасштабный полигон на частном жилом доме в Ивановской области. Полигон представляет собой участок стены жилого дома, оштукатуренный цементным раствором толщиной 10 мм и разделённый на четыре зоны, с нанесёнными на них различными видами тепловой изоляции. Каждая зона стены представляет собой прямоугольник высотой 3,9 м и шириной 2 м. Для исследований были выбраны следующие виды покрытий:

а) декоративная штукатурка на минераловатной тепловой изоляции, выполненной по технологии «мокрого» фасада;

б) энергосберегающая краска на основе полых стеклянных микросфер марки МС-В2Л в связующем материале из стирол-акриловой дисперсии «Акрилан 101»;

в) цементно-песчаная штукатурка;

г) силикатный кирпич.

В ходе проведения экспериментов были измерены температуры поверхностей каждого вида тепловой изоляции при помощи инфракрасного термометра (пирометра) "Thermopoint" и его выносного контактного зонда.

Интегральную степень черноты (ϵ_{ϕ}) исследуемых поверхностей в диапазоне температур $-20 \pm 0^{\circ}\text{C}$ рассчитывали по формуле:

$$\epsilon_{\phi} = \frac{\epsilon_n T_n^4}{T_{\phi}^4}$$

где ϵ_n - степень черноты, на которую настроен инфракрасный термометр; T_n - температура по показаниям инфракрасного термометра, К; T_{ϕ} - фактическая температура поверхности, измеренная при помощи контактного зонда, К.

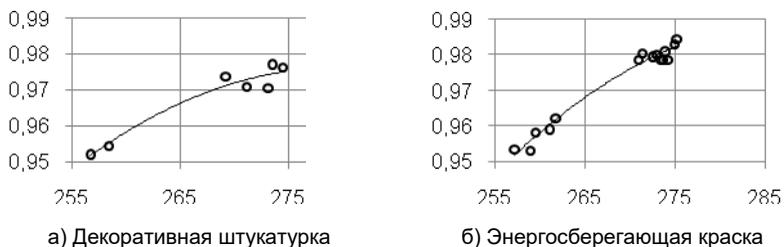


Рис. 1 Интегральная степень черноты поверхности в зависимости от температуры, К

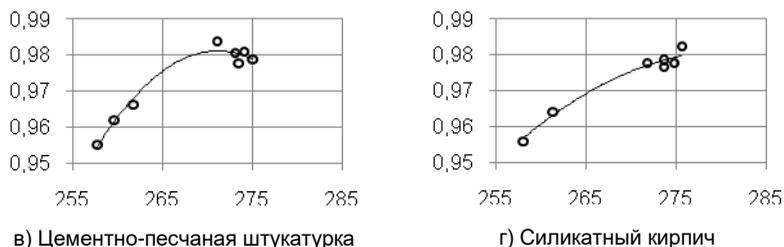


Рис. 1 (продолжение) Интегральная степень черноты поверхности в зависимости от температуры, К

Результаты расчёта средней интегральной степени черноты строительных материалов и энергосберегающей краски приведены в таблице.

Таблица. Средняя интегральная степень черноты материалов в диапазоне температур $-20\div 0^{\circ}\text{C}$

Вид тепловой изоляции	$\epsilon_{\text{ф}}$
Декоративная штукатурка «мокрого» фасада	0,962
Энергосберегающая краска	0,969
Цементная штукатурка	0,972
Силикатный кирпич	0,969

Анализ данных таблицы показывает, что, в диапазоне температур $-20\div 0^{\circ}\text{C}$ значения средней интегральной степени черноты всех исследуемых покрытий практически совпадают и лежат в диапазоне $0,96\div 0,98$.

Вывод. Получены экспериментальные данные о величине средней интегральной степени черноты строительных материалов и энергосберегающих покрытий в диапазоне температур $-20\div 0^{\circ}\text{C}$, характерных для большинства центральных районов России в зимний период.

Литература

1. **Артемов, А.С.** Нанотехнологии: перспективные направления развития экономики/А.С. Артемов, Г.Ю. Исаев//Россия и мировое сообщество перед вызовами нестабильности экономических и правовых систем: материалы международной научно-практической конференции (Москва, 16-18 апреля 2012 г.); В 6 ч. Ч.1/Международный институт экономики и права; под общ. ред. Ф.Л. Шарова. - М.: МИЭП, 2012.- С.69-72.
2. **Бояринцев, А.В.** Тепло, сохранённое КОРУНДом/ А.В. Бояринцев// Кровельные и изоляционные материалы.- 2010. - №4. - С. 10-11
3. **Игнатова, О.А.** Технология изоляционных строительных материалов и изделий. В 2 ч. Ч.2. Тепло- и гидроизоляционные материалы и изделия: учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. Образования / О.А. Игнатова. - М.: Издательский центр «Академия», 2012.-288 с.

УДК 697.245.384, 697.273.2

Ю.С. ПЛЕТНИКОВА, к.т.н., доцент,
В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: ba06095@mail.ru, yusoln@mail.ru

Оценка экономической эффективности замены централизованного отопления системой лучистого отопления

Аннотация: приведены результаты оценки экономической эффективности замены системы централизованного отопления производственного здания на систему инфракрасного отопления с газовыми излучателями. Показано, что для зонального отопления цеха с заданным интервалом значений относительной влажности воздуха, система лучистого отопления экономически эффективна.

Ключевые слова: инфракрасный излучатель, система лучистого отопления здания, зональное отопление, экономический эффект.

Y.S. PLETNIKOVA, Doctor of Philosophy, assistant professor,
V.V. BUKHMIROV, Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

Estimation of economic efficiency replacement central heating system radiant heating

Abstract. The results of the evaluation of the economic efficiency of the replacement of the central heating system of a production building with an infrared heating system with gas radiators are presented. It is shown that for a district heating of a shop with a specified range of relative humidity values, the radiant heating system is economically efficient.

Key words: Infrared radiator, radiant heating system of the building, zone heating, economic effect.

Для создания оптимальных параметров микроклимата в рабочих зонах промышленных зданий и в жилых помещениях социальных учреждений применяют различные системы отопления, которые основаны на законах конвективного и (или) радиационного переноса тепловой энергии. Огромная номенклатура отопительных приборов, как конвективного, так и лучистого типов говорит о том, что проблема выбора рациональной системы отопления далека от своего решения. На наш взгляд, ни одна из существующих систем отопления не может претендовать на универсальность, поэтому окончательное решение зависит от особых требований Заказчика к системе отопления. Однако для всех типов отопительных систем важнейшим показателем является их энергетическая экономичность.

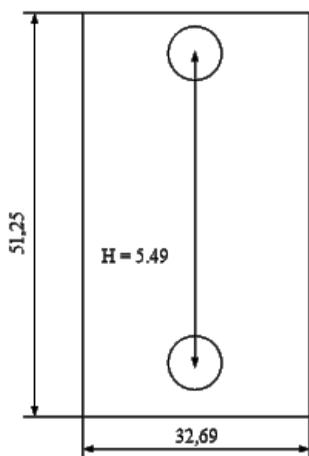


Рис. 1. План цеха предприятия

Экономическая оценка замены системы централизованного отопления системой локального инфракрасного отопления проведена для условий одного из цехов текстильного предприятия Ивановской области. План цеха приведен на рис. 1. Пусть требуется разработать систему локального инфракрасного отопления – отопления зон, отмеченных на рис. 1 кругами.

При помощи двухэтапной математической модели [1] разработана система локального отопления помещения, показанного на рис. 1.

Расчетное количество тепла на отопление данного цеха составляет 460,31 Гкал/год (101,39 кВт). Мощность инфракрасных излучателей, необходимых для зонального отопления двух

рабочих мест общей площадью 32 м² в первом приближении равна:

$$W_{\text{зон}} = \Delta Q \cdot \left(1 - \frac{F_{\text{зон}}}{F_{\text{пом}}}\right) \cdot \frac{a}{h} = 101,39 \cdot \left(1 - \frac{32}{51,25 \cdot 32,69}\right) \cdot \frac{1,7}{5,49} = 30,8 \text{ кВт}.$$

Для зонального отопления цеха выберем два «темных» инфракрасных излучателя модели FRA2-3 итальянской фирмы FRACCARO максимальной единичной мощностью 15 кВт. Расчет выполнен при высоте подвеса излучателей 5 м.

Для помещения цеха текстильного предприятия Ивановской области с размерами 51,25 × 32,69 × 5,49 м при температуре наружного воздуха – 30°C, относительной влажности внутреннего воздуха 85 % и высоте подвеса излучателей 5 м единичной мощностью 10,86 кВт плотность падающего теплового потока уменьшается на 22,8 %.

Выполним экономический расчет замены централизованного отопления на систему зонального лучистого отопления.

Затраты на централизованную систему отопления определены по формуле:

$$Z_{от}^{общ} = Q_{от.п.} \cdot Ц = 460,31 \cdot 1655,63 = 762103,05 \text{ руб.},$$

где $Q_{от.п.}$ – количество тепловой энергии на отопление помещения, Гкал/год; $Ц$ – цена 1 Гкал, руб./Гкал.

Капитальные затраты на покупку, доставку и монтаж обогревателей и терморегуляторов составят:

$$Z_{общ} = Z_{пр} + Z_{д} + Z_{монт} = 146208 \text{ руб.},$$

где $Z_{общ}$ – общие затраты на внедрение рекомендации, руб.; $Z_{пр}$, $Z_{д}$, $Z_{монт}$ – затраты на приобретение, доставку и монтаж излучателей и терморегуляторов соответственно, руб.

Расчет экономического эффекта выполнен при условии соответствия температур наружного воздуха температурам, указанным в СНиП 23-01-99 [2] для города Иваново. Экономический эффект составит:

$$\mathcal{E} = Z_{от}^{общ} - G \cdot Ц \cdot 24 \cdot 219 \cdot n = 707955,74 \text{ руб.},$$

где \mathcal{E} – экономический эффект от применения данного энергосберегающего мероприятия, руб.; G – расход газа при режиме работы однотрубного излучателя, обеспечивающем требуемые согласно нормативным документам [3, 4] температуры в рабочей зоне помещения, м³/ч; $Ц$ – цена 1 м³ газа, руб./м³; 24 – число часов работы нагревателей в сутки; 219 – число суток в отопительном периоде для города Иваново; n – количество однотрубных нагревателей, предлагаемых к внедрению.

Простой срок окупаемости энергосберегающего мероприятия составит:

$$\tau_{ок} = Z_{общ} / \mathcal{E} = 0,21 \text{ года.}$$

Так как капитальные затраты на реализацию мероприятия должны быть единовременными, то чистый дисконтированный доход (ЧДД) после внедрения мероприятия будет равен, руб.:

$$\text{ЧДД} = \mathcal{E} \cdot \frac{1 - (1 + R)^{-\tau_{ж}}}{R} - Z_{общ} = 707955,74 \cdot \frac{1 - (1 + 0,15)^{-25}}{0,15} = 4576331,45 > 0$$

где \mathcal{E} – экономия энергоресурсов в денежном выражении, руб.; R – норма дисконта, доли; $\tau_{ж}$ – время жизни проекта, лет; $Z_{общ}$ – суммарные капитальные затраты на проект, руб.

Вывод. Положительное значение ЧДД проекта и относительно небольшой срок окупаемости свидетельствуют о целесообразности организации в помещении цеха зональной системы отопления с газовыми излучателями.

Литература

1. Солнышкова Ю.С. Совершенствование систем радиационного отопления зданий с целью сбережения энергетических ресурсов [Текст] / Ю.С. Солнышкова, автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук, Иваново, 2012. – 20 с.
2. СНИП 23-01-99. Строительная климатология: Утв. Постановлением Госстроя России от 11.06.99 №45, М., 2000. – 57 с.
3. ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны. (Изменения №1 20.06.2000) – М.: Изд-во стандартов, 1988. – 6 с.
4. ГОСТ 12.1.005-88. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.

УДК 669.041

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор;
Д.В. РАКУТИНА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Математическое моделирование сложного теплообмена в туннельной электрической печи

Аннотация: разработана математическая модель туннельной электрической печи для обжига абразивных кругов. Предложены рекомендации по совершенствованию режима работы туннельной печи.

Ключевые слова: туннельная электрическая печь, абразивные круги, математическое моделирование.

V.V. BUHMIROV, Doctor of Engineering, professor,
D.V. RAKUTINA, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Mathematical modeling of complex heat transfer in the tunnel electric furnace

Abstract: the mathematical model of the tunnel electric furnace is developed for roasting of abrasive disks. Recommendations about improvement of an operating mode of the tunnel furnace are offered.

Key words: tunnel electric furnace, abrasive disks, mathematical modeling.

В настоящее время математические модели тепловой работы печных агрегатов широко применяются как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации уже существующих установок. Математическое моделирование позволяет создавать энергоэффективные тепло-

технологические установки, а также выбирать оптимальные режимные параметры их работы.

Туннельная печь предназначена для обжига абразивных изделий на керамической связке. Режим работы печи квазистационарный. По длине печь делится на три зоны: нагрева, обжига и охлаждения. Нагрев и обжиг изделий ведется карбид-кремниевыми нагревателями. Печь имеет три яруса по высоте: верхний, средний и нижний. Электрические нагреватели установлены в каждом ярусе. Садка состоит из уложенных друг на друга абразивных кругов, которые перемещаются вдоль печи на специальной плите. При этом между обжигаемыми изделиями и плитой-основанием находится порошкообразная прослойка из электрокорунда.

Экспериментальное исследование туннельной обжиговой печи выявило отклонение режима работы данной установки от заданного по технологической инструкции [1].

Математическое моделирование тепловой работы данной печи основано на решении задач внешнего и внутреннего теплообмена. В результате решения внешней задачи находим результирующие тепловые потоки на поверхностях абразивных заготовок и обмуровки печи, необходимые для расчета температурного поля садки в процессе термообработки, т.е. для решения внутренней задачи.

Моделирование внешнего теплообмена в электрической печи выполнено на основе резольвентного метода расчета [2]. В печи было выделено 28 расчетных участков, в пределах которых температура изменялась не более чем на 100 °С. На каждом расчетном участке верхнего и среднего яруса также было выделено по четыре расчетные зоны: 1 – тепловоспринимающая поверхность нагреваемых изделий, 2 – поверхность свода печи, 3 – боковая поверхность обмуровки, 4 – поверхность электрических нагревателей. В нижнем ярусе печи зона нагреваемого материала отсутствует. Торцевые зоны первого и последнего участков считаем абсолютно черными поверхностями с температурой окружающей среды. Таким образом, для каждого яруса выделено 127 зон и, соответственно, необходимо рассчитать 16129 угловых коэффициентов. Угловые коэффициенты рассчитаны по известным формулам [3]. Разрешающие угловые коэффициенты в рамках резольвентного зонального метода найдены решением системы уравнений (1) итерационным методом Ньютона.

$$\Phi_{(i,m)-(j,n)} = \Phi_{(i,m)-(j,n)} + \sum_k \Phi_{(i,m)-k} R_k \Phi_{k-(j,n)}, \quad (1)$$

где $\Phi_{(i,m)-(j,n)}$ и $\Phi_{(i,m)-(j,n)}$ - угловые и разрешающие угловые коэффициенты излучения с m -ой зоны i -го расчетного участка на n -ую зону j -го расчетного участка; R_k - отражательная способность k -й зоны.

Система балансовых зональных уравнений для расчетных зон 2-го и 3-го рода, соответствующих поверхностям электрических нагревателей и кладки печи, имеет вид

$$\sum_{(i,m)} \sum_{(j,n)} a_{(j,n)-(i,m)} T_{(j,n)}^4 + h_{mm}^{(i)} T_{(i,m)} + h_m^{0(i)} = 0, \quad (2)$$

где $h_{mm}^{(i)}$ и $h_m^{0(i)}$ - балансовые коэффициенты, учитывающие тепловыделение в электрических нагревателях и потери тепла в окружающую среду; $a_{(i,m)-(j,n)}$ - коэффициенты радиационного теплообмена, рассчитанные по формуле

$$a_{(i,m)-(j,n)} = \varepsilon_{(i,m)} \sigma_0 F_{(i,m)} (\Phi_{(i,m)-(j,n)} \varepsilon_{(j,n)} - \delta_{(i,m)-(j,n)}). \quad (3)$$

В формуле (3): $\varepsilon_{(i,m)}$ и $F_{(i,m)}$ - степень черноты и площадь m -ой зоны i -го расчетного участка; σ_0 - постоянная Стефана-Больцмана; $\delta_{(i,m)-(j,n)}$ - символ Кронекера.

Решением системы балансовых зональных уравнений (2) итерационным методом Ньютона, найдены температуры поверхностей электрических нагревателей и кладки печи. Далее определены плотности потоков результирующего излучения для расчетных зон 1-го рода, соответствующих нагреваемым изделиям и нижним поверхностям плит верхнего и среднего ярусов, по формуле

$$q_{(i,m)}^p = \sum_{(j,n)} a_{(j,n)-(i,m)} T_{(j,n)}^4 / F_{(i,m)}. \quad (4)$$

Полученные значения плотности потоков результирующего излучения являются исходными данными для решения внутренней задачи теплообмена, для решения которой в печи выделена повторяющаяся область, состоящая из стопки абразивных кругов и плиты-подины, на которой они установлены.

Температурное поле абразивных кругов и плиты-подины найдено решением дифференциального уравнения теплопроводности, записанного в цилиндрической (5) и декартовой (6) системах координат.

$$c'(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda(T) r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right), \quad (5)$$

$$c'(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (6)$$

В уравнениях (5) и (6): T - температура; t - время; $c'(T)$ - удельная объемная теплоемкость; $\lambda(T)$ - коэффициент теплопроводности; r, z - цилиндрические координаты; x, z - декартовы координаты.

Температура промежуточного слоя из порошкообразного корунда между абразивными кругами, а также между кругами и плитой-подиной найдена в результате решения уравнения теплового баланса для термически тонкого тела

$$c'(T) \frac{\partial T}{\partial t} \delta = q_N(r) - q_{N+1}(r) \quad (7)$$

где δ - толщина промежуточного слоя; $q_N(r)$ - плотность теплового потока, поступающего на промежуточный слой; $q_{N+1}(r)$ - плотность теплового потока, выходящего из промежуточного слоя.

Предполагаем, что перед началом термообработки заготовки абразивного инструмента и плиты-подина равномерно прогреты. С учетом этого начальные условия принимают вид

$$T(r, z, 0) = T_{01}, \quad T(x, y, z, 0) = T_{02}. \quad (8)$$

На обогреваемых поверхностях абразивных заготовок и плиты-подины задана плотность теплового потока, поступающего на поверхность зон (граничные условия второго рода), которая находится в результате решения задачи внешнего теплообмена.

Для определения переменной по высоте садки плотности теплового потока были найдены угловые коэффициенты, для расчета которых были использованы известные зависимости, а также свойства угловых коэффициентов [3].

Расчет температурного поля выполнен методом конечных разностей по неявной конечно-разностной схеме. Разностная аппроксимация дифференциальных уравнений теплопроводности (5), (6), (7) и краевых условий выполнена методом контрольного объема.

Разработанная математическая модель тепловой работы туннельной обжиговой печи реализована в виде вычислительной программы на языке программирования Delphi 7 (рис. 1).

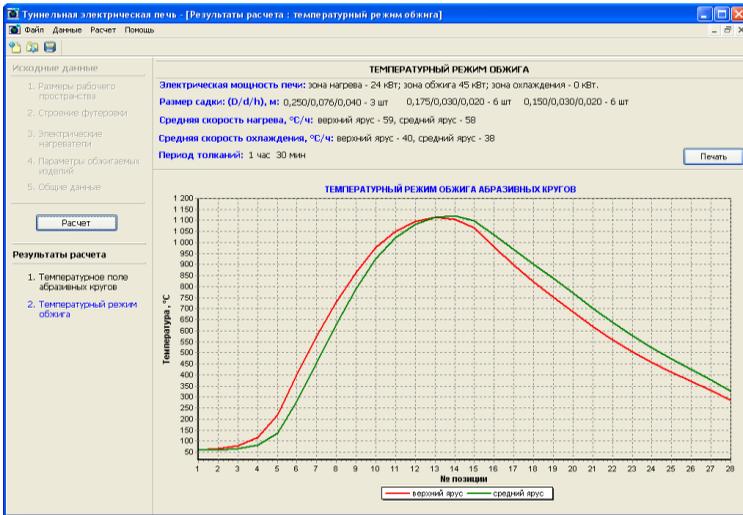


Рис. 1. Программа для расчета тепловой работы туннельной электрической печи

Входными параметрами модели являются: размеры рабочего пространства печи и обжигаемых изделий, теплофизические свойства абразивного материала и футеровки печи, размеры и мощность электрических нагревателей. В результате расчета получаем: двумерное температурное поле абразивных кругов и плиты подины, температурное поле кладки, а также тепловой баланс печи.

Расчет на математической модели сопоставлен с данными промышленных испытаний туннельной электрической печи [1]. Сопоставление показало удовлетворительное совпадение результатов проведенного вычислительного эксперимента и опытных данных. Предложенная модель туннельной обжиговой печи позволяет повысить качество выпускаемой продукции за счет выбора рациональной системы отопления для разного типоразмера обжигаемых изделий, усовершенствовать конструкцию ограждений печи и в целом повысить энергоэффективность работы печных агрегатов данного типа.

Литература

1. **Бухмиров В.В., Гнездов Е.Н., Ракутина Д.В.** Экспериментальное исследование тепловой работы двухцелевой электрической печи для обжига абразивных изделий // Промышленные печи и трубы. – 2006. - №1. С. 75-79.
2. **Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупенников С.А.** Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: Учебник для вузов. - М.: Металлургия, 1990. - 239 с.
3. **Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н.** Теплообмен излучением: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 432 с.

СЕКЦИЯ 12. «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ»

УДК 621.927

И.А. БАЛАГУРОВ¹, аспирант, В.Е. МИЗОНОВ¹, д.т.н., профессор,
Н. BERTHIAUX², Doctor of Engineering, professor,
С. GATUMEL², Doctor of Engineering

¹Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

²EcoledesMinesd'Albi-Carmaux, Albi, France

E-mail: mizonov46@mail.ru, berthiau@enstimac.fr

Экспериментальное исследование вибрационного смесителя с многослойной загрузкой

Аннотация. Приведены результаты экспериментального исследования кинетики формирования смеси дисперсных материалов в новом вибрационном смесителе с многослойной загрузкой компонентов. Опытные данные хорошо соответствуют расчетам по разработанной ранее математической модели.

Ключевые слова: сыпучий материал, многокомпонентная смесь, кинетика смешивания, многослойная загрузка.

I.A. BALAGUROV¹, postgraduate student,
V.E. MIZONOV¹, Doctor of Engineering, professor,
H. BERTHIAUX², Doctor of Engineering, professor,
С.GATUMEL², Doctor of Engineering

¹Ivanovo State Power Engineering University,
Rabfakovskaya 34, 153003, Ivanovo

²EcoledesMinesd'Albi-Carmaux, Albi, France

E-mail: mizonov46@mail.ru, berthiau@enstimac.fr

Experimental study of vibration mixer with multi-layer loading

Abstract. The objective of the investigation is the search for rational load of segregating components in a batch vibration mixer. At the usual load in two layers a long mixing time is required and the mixture cannot become completely homogeneous because of segregation. Loading layer by layer requires longer time but the mixing time and negative influence of segregation become smaller. The layer-by-layer loading was investigated experimentally at the special laboratory set-up. It was shown that the high accuracy of layers positioning can be reached.

Key words: granular material, multi-component mixture, mixing kinetics, multi-layer loading.

Получение однородных многокомпонентных смесей дисперсных материалов является, с одной стороны, важной технологической, а с другой, сложной технологической задачей. При смешивании разнородных

компонентов всегда присутствует сегрегация, которая не позволяет добиться полной однородности смеси в принципе. В начальный период смешивания однородность смеси увеличивается, затем достигает максимума, после чего однородность начинает ухудшаться.

В работе [1] предложена теория многокомпонентного перемешивания и показано, что многослойная загрузка компонентов в смеситель позволяет значительно улучшить максимальное качество смеси и снизить необходимое время смешивания. Конструкция вибрационного смесителя для многослойной загрузки и результаты его экспериментального исследования показаны на рис.1-3.

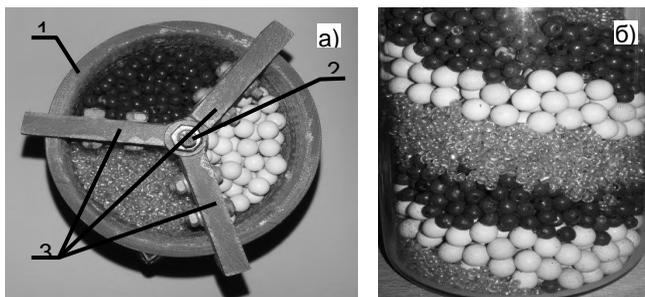


Рис.1. Многослойная загрузка компонентов: а – устройство для загрузки: 1 – смесительная камера; 2 – вертикальный вал; 3 – разделительные перегородки; б – распределение компонентов после загрузки

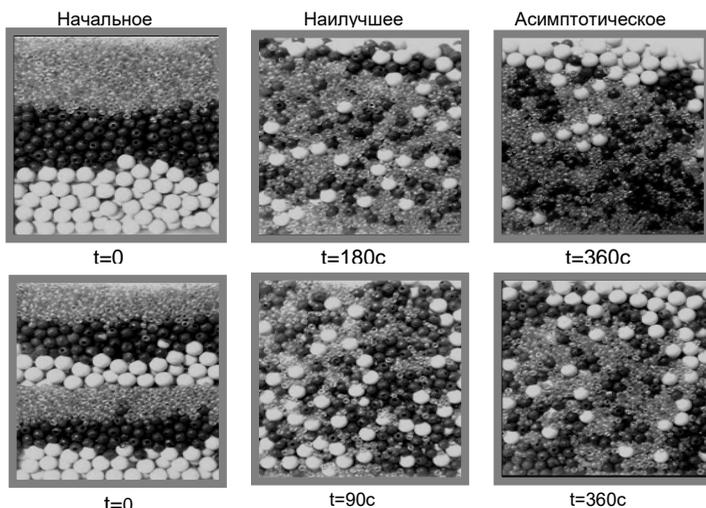


Рис. 2. Распределение компонентов в смеси в различные моменты времени при однослойной (вверху) и многослойной (внизу) загрузке

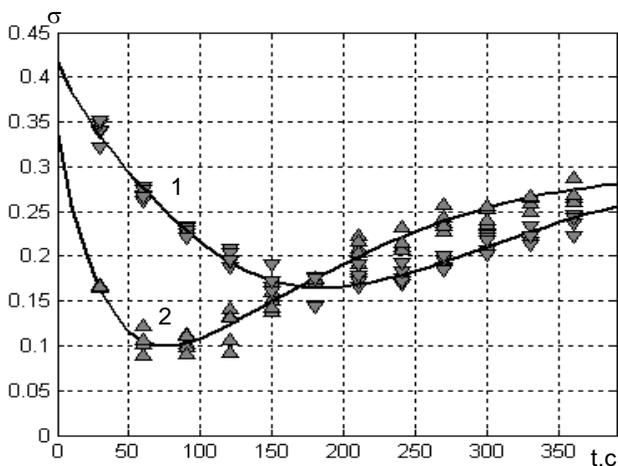


Рис. 3. Кинетика смешивания при однослойной (1) и многослойной (2) загрузке

На рис. 1а показана фотография смесителя, в котором на вертикальном валу размещены перегородки, между которыми засыпаются компоненты. Вал приводится во вращение и одновременно поднимается вверх. Результат такой многослойной загрузки показан на рис. 1б, где компоненты уже предварительно перемешаны.

На рис. 2 показано сравнение состояния смеси в различные моменты времени при однослойной и двухслойной загрузке. При двухслойной загрузке наиболее однородная смесь достигается раньше и имеет лучшее качество.

Рис. 3 иллюстрирует расчетную и экспериментальную кинетику смешивания для разных случаев загрузки. Степень однородности смеси характеризуется среднеквадратичным отклонением σ содержания компонентов от равномерного. Для расчета σ каждые 30 сек делались фотографии смеси, которые затем обрабатывались с помощью специально разработанной программы по распознаванию образов. Двухслойная загрузка позволяет уменьшить необходимое время смешивания в два раза и в более чем в полтора раза снизить предельную неоднородность смеси. Линии на графике соответствуют расчетной кинетике по описанной в [1] модели. Сравнение расчетных и опытных данных свидетельствует об их хорошем совпадении.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №15-08-01684.

Литература

1. Mizonov, V., Balagurov, I., Berthiaux, H., Gatamel, C. A Markov chain model of mixing kinetics for ternary mixture of dissimilar particulate solids. Particology (2016), <http://dx.doi.org/10.1016/j.partic.2016.05.006>

УДК 620.9(063)

А.В. МИТРОФАНОВ¹, к.т.н., доцент, А. КАМЕЛО, аспирант,
К. TANNOUS², Doctor of Engineering, professor

¹Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

²University of Campinas, Brazil

e-mail: and2mit@mail.ru, katia@feq.unicamp.br

Влияние параметров кипящего слоя на эффективность обработки дисперсных материалов

Аннотация. Предложена ячеечная модель кипящего слоя, учитывающая возможность циркуляции частиц, и выполнены численные эксперименты по влиянию параметров слоя на эффективность термической и/или химической переработки дисперсных материалов.

Ключевые слова: кипящий слой, циркуляция, скорость реакции, задержка по времени.

A.V. MITROFANOV¹, Candidate of Engineering, Docent,
A. CAMELO¹, postgraduate student
K. TANNOUS², Doctor of Engineering, professor

¹Ivanovo State Power Engineering University

Rabfakovskaya 34, 153003 Ivanovo

²University of Campinas, Brazil

e-mail: and2mit@mail.ru, katia@feq.unicamp.br

Influence of fluidized bed parameters on the efficiency of particulate solids treatment

Abstract. A cell mathematical model of fluidized bed is proposed. The model takes into account the possibility of particulate solids circulation. Numerical experiments of influence of the bed parameters on the efficiency of particulate solids thermal and/or chemical treatment are performed.

Key words: fluidized bed, circulation, reaction rate, time delay

Рассматривается процесс в периодическом циркуляционном кипящем слое, в котором происходит переработка исходного продукта А в готовый продукт В согласно физическому или химическому превращению $A \rightarrow B$, кинетика которого считается известной. Ячеечная модель реактора и схема циркулирующих потоков дисперсного материала показана на рис.1. Высота реактора разбита на m ячеек идеального перемешивания, а текущее распределение содержания частиц по высоте представлено вектором столбцом $\mathbf{S}=\{S_j\}$ размером $m \times 1$, где j – номер ячейки, отсчитываемы снизу. Состояние процесса фиксируется в дискретные моменты времени $t_k=(k-1)\Delta t$, где Δt – продолжительность временного перехода, а k – его порядковый номер (дискретный аналог

текущего времени). Эволюция состояния процесса (распределения материала по ячейкам) рекуррентным матричными равенствами:

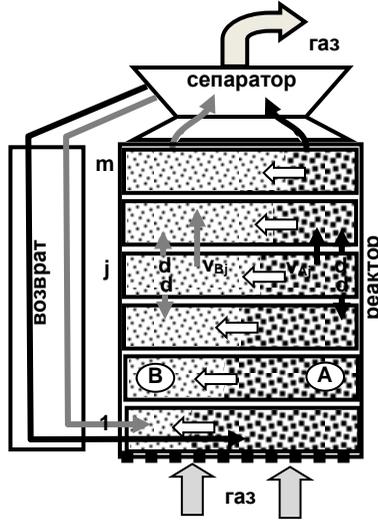


Рис.1. Ячеечная модель циркуляционного кипящего слоя

$$\mathbf{S}_A^{k+1} = \mathbf{P}_A (\mathbf{S}_A^k - \Delta \mathbf{S}_{AR}^k + \Delta \mathbf{S}_{Ain}^k - \Delta \mathbf{S}_{Aout}^k), \quad (1)$$

$$\mathbf{S}_B^{k+1} = \mathbf{P}_B (\mathbf{S}_B^k + \Delta \mathbf{S}_{AR}^k + \Delta \mathbf{S}_{Bin}^k - \Delta \mathbf{S}_{Bout}^k), \quad (2)$$

где \mathbf{P} – матрицы переходных вероятностей, которые описывают доли материала, переносимые в течение Δt в соседние ячейки цепи. Правила их построения подробно описаны в работе [1]. Вектор $\Delta \mathbf{S}_{AR}^k$ описывает кинетику превращения $A \rightarrow B$, то есть долю вещества в ячейке j , переходящую в течение Δt из состояния A в состояние B . Его элементы заданы равенством

$$\Delta S_{ARj}^k = \alpha_j^k S_{Aj}^k \Delta t = \alpha_0 (w_j^k / w_s)^{n_R} S_{Aj}^k \Delta t, \quad (3)$$

где α_j^k – постоянная скорости реакции превращения $A \rightarrow B$, которая считается зависящей от локальной скорости обтекания частиц A w_j^k , w_s – скорость начала псевдооживления материала A , α_0 и n_R – постоянные параметры.

Векторы $\Delta \mathbf{S}_{Aout}^k$ и $\Delta \mathbf{S}_{Bout}^k$ имеют единственные ненулевые элементы для верхней ячейки с номером $j=m$. Это выносы материалов A и B из верхней ячейки в течение Δt , которые рассчитываются по формулам

$$q_{Aout}^k = S_{A,m}^k v_{A,m}^k, \quad q_{Bout}^k = S_{B,m}^k v_{B,m}^k, \quad (4)$$

где v_m^k – скорость выноса газом частиц из последней ячейки, рассчитываемая с учетом стесненности их обтекания [1]. Эти же потоки подаются в нижнюю (или иную) ячейку, но обычно с задержкой по времени, так как осаждение частиц в камере возврата происходит медленнее, чем их подъем в реакторе. При задержке k_d временных переходов эти потоки формируют векторы ΔS^k_{Ain} и ΔS^k_{Bin} при $k > k_d$; до этого они равны нулю.

Описанная выше модель дает полную характеристику распределенного по высоте процесса и позволяет рассчитывать его кинетику, например, степень превращения $A \rightarrow B$. Ниже скорость протекания процесса оценивается величиной $k_{0,95}$ – числом переходов до превращения A в B на 95%.

На рис. 2 показаны результаты расчетного исследования влияния скорости газа на продолжительность процесса при различных временах задержки. Расчеты выполнены при $\alpha_0=0,03$ и $n_R=0,4$.

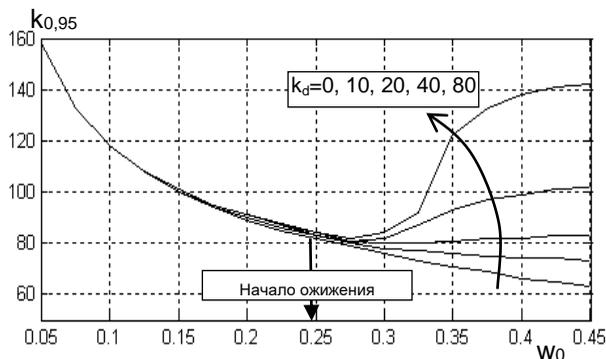


Рис. 2. Влияние скорости газа на продолжительность процесса при различных временах задержки

Пока реакция идет в плотном слое, время задержки не оказывает заметного влияния на время завершения реакции. При нулевой задержке с ростом скорости величина $k_{0,95}$ продолжает снижаться с ростом скорости, но уже при задержке 20 временных переходов ее снижение прекращается, а при больших задержках она снова начинает возрастать, то есть выигрыш от циркуляции по сравнению с плотным слоем прекращается.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 15-08-01684.

Литература

1. **Mizonov, V.** Modeling of Particle Concentration Distribution in a Fluidized Bed by Means of the Theory of Markov Chains / V. Mizonov, A. Mitrofanov, A. Ogurtzov, K. Tannous // Particulate Science and Technology. – 2014. – Vol. 32 (2). – P. 171 – 178.

УДК 620.9(063)

А.В. МИТРОФАНОВ¹, к.т.н., доцент,
А. КАМЕЛО¹, аспирант,
Л.Н. ОВЧИННИКОВ², д.т.н., профессор

¹Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

²Ивановский государственный химико-технологический университет
153003, г. Иваново, пр. Шереметьевский 7

E-mail: and2mit@mail.ru, ovchinnikovnl_1972@mail.ru

Моделирование сушки дисперсных материалов в кипящем слое

Аннотация: теория цепей Маркова использована для моделирования процесса сушки в коническом и циркуляционном кипящем слое. Сопоставлены полученные расчетные данные по интенсивности сушки для этих двух типов реакторов. Как показывают полученные результаты циркуляционный кипящий слой обеспечивает более интенсивный тепло- и массоперенос по сравнению с периодическим псевдооживлением. Кроме того, расчетная интенсивность сушки уменьшалась с увеличением угла наклона стенок конического реактора.

Ключевые слова: Цепь Маркова, сушка, влагосодержание, теплоперенос.

A.V. MITROFANOV¹, Candidate of Engineering, Docent,
A. CAMELO¹, postgraduate student
L.N. OVCHINNIKOV², Doctor of Engineering, professor

¹Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St. 34,

²Ivanovo State University for Chemistry and Technology
153000 Ivanovo, Sheremetievskiy Av. 7

E-mail: and2mit@mail.ru, ovchinnikovnl_1972@mail.ru

Modeling of particulate solids drying in a fluidized bed

Abstract: a Markov chain approach is used for simulating of drying process in a conical fluidized bed and in a circulating fluidized bed. The obtained calculation data on drying activity for these two types of apparatus have been compared. It can be concluded from the obtained results that circulating fluidization provides more intensive heat and mass transfer compared to batch fluidization. Also it can be noted that calculated drying rate decreases with increasing of the tilt angle of walls in the tapered reactor.

Key words: Markov chain, drying, moisture content, heat transfer.

При организации сушки дисперсного топлива важным параметром является скорость фильтрации сушильного агента сквозь пустоты между зёрнами материала. Заметным недостатком цилиндрических реакторов является невозможность повышать скорость воздуха и интенсифицировать за счёт этого межфазное взаимодействие без выноса частиц

из аппарата. Наиболее традиционным решением этой проблемы является наклон стенок аппарата – переход к конической его форме. Однако излишний наклон приводит к изменению характера псевдооживления или его прекращению (например, фонтанированию или забиванию реактора). Другим решением, позволяющим увеличить скорость ожигающего воздуха, является организация циркулирующего кипящего слоя, когда твердая фаза, выносимая из «основного» реактора, попадает во «вспомогательный», откуда принудительно возвращается обратно в «основной». При такой схеме, казалось бы, можно совершенно не заботиться о выборе скорости ожигающего агента, однако, на практике легко достигается потеря устойчивости работы таких систем (например, из-за чрезмерного уноса материала и «заваливания» одного из реакторов) [1].

В ряде работ подчеркивается необходимость учета локальных параметров движения сушильного агента [2] и изменения поверхности межфазного взаимодействия [3] в химических и энергетических реакторах.

Таким образом, даже предварительное расчетное сравнение эффективности работы различных типов аппаратов с кипящим слоем, выполненное с учетом локальных параметров реализации процесса, является актуальным. В настоящей работе предпринято расчетное исследование скорости сушки в зависимости от выбора технологии псевдооживления. Расчеты выполнены на основе ячеечных моделей псевдооживления, предложенных в работах [4-5].

В основу модели положена ячейечная схема: аппарат представлен как совокупность из n ячеек, а эволюция векторов состояний наблюдается в дискретные моменты времени $t_k = (k-1)\Delta t$, где Δt – продолжительность временного перехода, а k – номер временного перехода (целочисленный аналог времени). Продольные миграции частиц и продвижение воздуха вдоль цепей описывается рекуррентными матричными равенствами

$$\mathbf{S}_p^{k+1} = \mathbf{P}_p^k \mathbf{S}_p^k, \quad (1)$$

$$\mathbf{S}_g^{k+1} = \mathbf{P}_g^k \mathbf{S}_g^k + \mathbf{S}_{gf}, \quad (2)$$

где \mathbf{S}_p и \mathbf{S}_g – вектор-столбцы объемного содержания частиц и газа в ячейках, \mathbf{P}_p^k и \mathbf{P}_g^k – матрицы переходных вероятностей для частиц и газа, зависящие от векторов состояния и меняющиеся на каждом переходе, \mathbf{S}_{gf} – вектор подачи газа (при подаче через решетку он имеет единственный ненулевой элемент в первой ячейке, равный объему газа, подаваемому в нее за один переход).

Рекуррентные операции (1)-(2) описывают перенос фаз вдоль моделируемого реактора, межфазное взаимодействие между сходственными ячейками цепей описывается балансовыми соотношениями, что обеспечивает качественную непротиворечивость получаемых решений.

Количественная достоверность достигается за счет использования эмпирических зависимостей для описания кинетики межфазных взаимодействий. Подробное описание модели и эмпирических процедур приведено в работах [2, 5].

В настоящей работе предложенные ранее модели применены для оценки эффективности сушки дисперсного материала. При заданном расходе сушильного агента ($285 \text{ м}^3/\text{ч}$), его температуре (45°C), диаметре газораспределительного устройства ($0,1 \text{ м}$) и массе загрузки аппарата ($0,5 \text{ кг}$) выполнено сравнение кинетики процесса сушки при различных конструктивных параметрах аппарата. Эффективность процесса оценивалось по среднему значению влагосодержания материала, которое рассчитывалось как

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n S_p^k(i)}{\sum_{i=1}^n S_p^k(i)} X^k(i), \quad (3)$$

где X – расчетные значения влагосодержания ($\text{кг}/\text{кг}$), i – номер ячейки.

Сравнение протекания процесса в реакторах различных конструкций к расчетному моменту времени $t = 20$ минут показано на рис. 1.

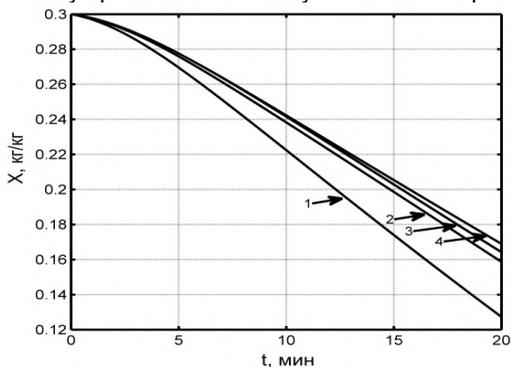


Рис. 1. Расчетное изменение влагосодержания частиц:

- 1 – аппарат с циркуляционным кипящим слоем; 2 – конический реактор с углом 5° на сторону; 3 – конический реактор с углом 10° на сторону; 4 – конический реактор с углом 15° на сторону.

Приведенные данные показывают, что аппарат с циркулирующим кипящим слоем обеспечивает такую интенсивность процесса сушки, которая недостижима в аппарате с периодическим кипящим слоем при том же расходе сушильного агента. Также необходимо отметить, что излишний наклон стенок конического реактора (5° на сторону) приводит к снижению эффективности процесса сушки.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №15-08-01684.

Литература

1. **Расчеты** аппаратов кипящего слоя: Справочник / Под ред. И.П. Мухленова, Б.С. Сажина, В.Ф. Фролова. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
2. **Митрофанов А.В.**, Tannous K., Мизонов В.Е. Экспериментальное исследование гидродинамики частиц биотоплива в топке с кипящим слоем // Вестник ИГЭУ. 2014. № 3. С. 65–67.
3. **Барочкин Е.В.**, Жуков В.П., Ненаездников А.Ю., Беляков А.Н., Росляков А.Н. Оптимальное управление межфазной поверхностью в барботажной ступени атмосферных деаэраторов // Вестник ИГЭУ. 2012. № 4. С 58-61
4. **Балагуров И.А.**, Мизонов В.Е., Митрофанов А.В. Математическая модель формирования многокомпонентной смеси сегрегирующих компонентов //Изв. Вузов. Химия и хим. технология. 2014. Т. 57. №. 8. С. 67-70.
5. **Mizonov V.**, Mitrofanov, A., Ogurtzov, A., Tannous, K. Modeling of particle concentration distribution in a fluidized bed by means of the theory of Markov chains. Part. Sci. Technol. 2014. V. 32. N. 2. P.171-178.

УДК 621.927

Е.А. ШУИНА, д.т.н., профессор,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: barantseva77@mail.ru

Решение задачи об оптимальном управлении потоком сегрегирующего компонента в смесителе периодического действия

Аннотация: рассмотрена математическая модель кинетики перемешивания склонного к сегрегации ключевого компонента сегораспределенной во времени подачи в рабочий объем смесителя. Показано, что существует оптимальная программа подачи, обеспечивающая наилучшее качество смеси.

Ключевые слова: сегрегация, смешивание, оптимизация.

E.A. SHUINA, Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University,
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St. 34
E-mail: barantseva77@mail.ru

A solution of the problem of optimum control of segregating component feed to a batch mixer

Abstract: a mathematical model of mixing kinetics of a segregating component with its distributed in time feed into an operating volume of a batch mixer is proposed. It is shown that there exists the optimum program of the feed providing the best quality of mixing.

Key words: segregation, mixing, optimization.

В данной работе приведены результаты по поиску рациональной программы загрузки склонного к сегрегации ключевого компонента в уже работающий смеситель, что для многих конструкций смесителей периодического действия не является технической трудностью. Для математического описания процесса используется подход, основанный на теории цепей Маркова [1].

Распределенная во времени подача ключевого компонента – это его непрерывная засыпка в смеситель в течение k первых переходов. Такой подаче соответствует вектор подачи, где в течение k первых переходов в первую ячейку на каждом переходе добавляется доля $1/k$ общей единичной загрузки ключевого компонента.

На рис.1 показана кинетика формирования качества смеси при различных значениях k , причем рассматривать изменение величины σ имеет смысл только при $i > k$, когда в смесителе находится уже весь ключевой компонент. Случай $k=1$ соответствует традиционной загрузке всего ключевого компонента в начале процесса. При $i=13$ достигается наилучшее качество смеси (минимум σ), которое затем быстро ухудшается. Здесь σ – среднее квадратичное отклонение. «Размазывание» подачи на 8 первых переходах приводит к смещению минимума вправо, что соответствует снижению производительности, однако само минимальное значение σ несколько уменьшается. Более заметно увеличение предельного качества смеси при $k=16$, но для его достижения также необходимо продолжать процесс после окончания загрузки компонента. Однако при $k=24$ процесс следует прервать сразу после окончания загрузки, так как качество сразу начинает ухудшаться.

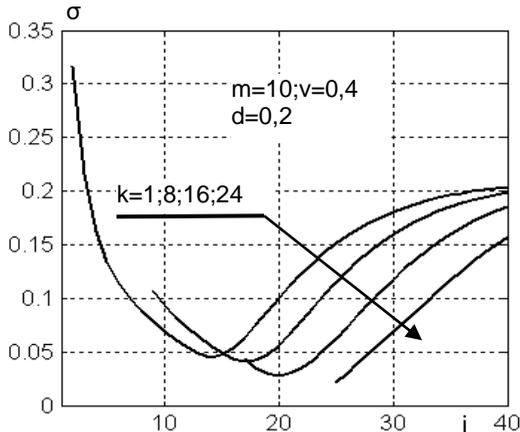


Рис.1. Кинетика формирования качества смеси при различных значениях k , m -количество ячеек, v -скорость сегрегации, d -коэффициент диффузии.

На рис. 2 показано влияние коэффициента диффузии на максимально достижимое качество смеси при такой подаче. При значениях k , не равных оптимальным, влияние весьма значительно, однако при значениях k , близких к оптимальным, оно практически исчезает.

На рис. 3 показана зависимость максимально достижимого качества смеси от продолжительности подачи ключевого компонента при различных скоростях сегрегации. При высоких скоростях сегрегации минимум σ при распределенной подаче значительно ниже, чем при одноразовой, то есть качество смеси может быть заметно улучшено.

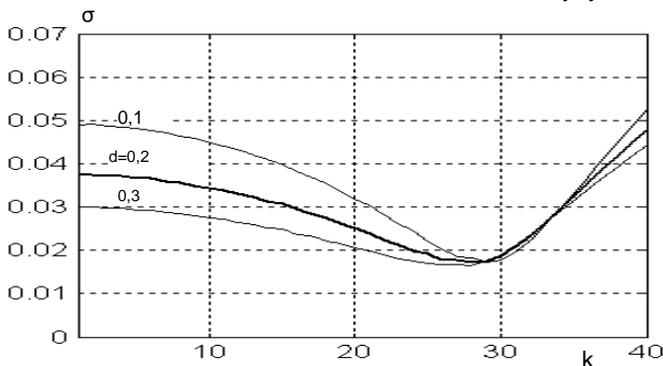


Рис.2. Максимально достижимое качество смеси при различных значениях коэффициента диффузии d

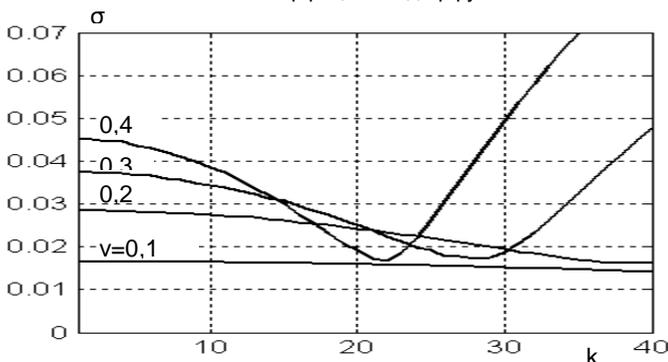


Рис.3. Максимально достижимое качество смеси при различных значениях коэффициента сегрегации v

Таким образом, показано, что существует оптимальная программа загрузки ключевого компонента, обеспечивающая наилучшее качество смеси склонных к сегрегации компонентов, причем при реализации этой программы максимально достижимое качество смеси незначительно зависит от скорости сегрегации.

Литература

1. Баранцева, Е.А., Мизонов, В.Е., Хохлова, Ю.В. Процессы смешивания сыпучих материалов: моделирование, оптимизация, расчет // ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». Иваново. – 2008. – 116.

УДК 621.926

Д.А. ОСИПОВ¹, аспирант, В.П. ЖУКОВ¹, д.т.н., профессор,
H. OTWINOWSKI², doctor of Engineering, professor,
D. URBANIAK², doctor of Engineering

¹Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

²Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland
e-mail: zhukov-home@yandex.ru, otwinowski@kkt.pcz.czyst.pl

Моделирование измельчения смеси разнопрочных компонентов

Аннотация. Для описания кинетики измельчения смеси компонентов предложена модель, которая позволяет учитывать нелинейные эффекты, связанные с влиянием кинетики измельчения одного компонента на кинетику измельчения другого компонента смеси. Приведены результаты расчетного анализа возможного разделения компонентов с различной прочностью путем их совместного измельчения.

Ключевые слова: сыпучий материал, смесь разнопрочных компонентов, кинетика измельчения, разделение компонентов.

D.A. OSIPOV¹, postgraduate student,
V.P. ZHUKOV¹, doctor of Engineering, professor,
H. OTWINOWSKI², doctor of Engineering, professor,
D. URBANIAK², doctor of Engineering

¹ Ivanovo State Power Engineering University, Rabfakovskaya 34, 153003 Ivanovo

²Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland
e-mail: zhukov-home@yandex.ru, otwinowski@kkt.pcz.czyst.pl

Simulation of grinding a mixture of different strengths components

Abstract. The results of the investigation allow developing of the concept of modeling based on discrete analog of the Boltzmann equation to the case of co-grinding a mixture of different strength components. The developed mathematical model is the basis for development of more effective methods of mechanical enrichment and separation of different strengths components of a mixture.

Key words: granular material, mixture components, with Different Strengths, kinetics grinding, separation of the components.

Из литературных источников известны различные подходы использования совместного измельчения разнопрочных материалов для обогащения смеси целевым компонентом [1]. Существующие модели [2,3] позволяют описывать измельчение однокомпонентных материалов или независимое измельчение двух- и более компонентов смеси, что зачастую приводит к существенным расчетным погрешностям. Исследование процесса совместного измельчения компонентов с учетом влияния каждого компонента на кинетику процесса является актуальной темой исследования для энергетической и смежных отраслей промышленности.

Целью исследования является моделирование процесса измельчения смеси компонентов для оценки условий, которые обеспечивают эффективное разделение этих компонентов.

Для исследования кинетики процесса предложена математическая модель, построенная на основе кинетического уравнения Больцмана [3]. В качестве определяющих координат расчетного пространства для описания процессов выбраны размер частиц δ , скорость движения частиц v и координата частиц в аппарате x . Для моделирования измельчения смеси компонентов свое расчетное пространство выделяется для каждого компонента. Использование при моделировании двух отдельных трехмерных расчетных пространств означает по существу введение в расчетное пространство новой, четвертой координаты, вдоль которой откладывается номер компонента смеси.

Для решения уравнения модели применяется матричный метод [3], в котором искомая непрерывная плотность распределения вещества по расчетному пространству заменяется дискретным ее представлением по выделенным ячейкам расчетного пространства. Многомерное расчетное пространство для этого преобразуется в одномерную цепь ячеек, искомая плотность распределения вещества по ячейкам представляется одномерным вектором $\mathbf{f} = \{f_i\}$, где индекс i показывает номер элемента. Указывая для каждой ячейки адреса ячеек, в которые возможен переход, и вероятности этих переходов p_{ij} , эволюция состояния системы во времени описывается выражением

$$f_i^{k+1} = \sum_j p_{ij} f_j^k, \quad (1)$$

где k – номер шага по времени. Порядок определения вероятностей переходов между ячейками выбранного расчетного пространства подробно представлен в работе [3].

В качестве интегральной оценки эффективности обогащения использован показатель степени очистки ε , значение которого при полном выделении ключевого компонента равно единице, а при отсутствии разделения – нулю: $\varepsilon = M_1 / M_{10} - M_2 / M_{20}$, где M – массопоток, индексы «1» и «2» соответствуют номеру компонента, индекс «0» относится к массопотоку на входе в аппарат. Значения массопотоков определялись

в ходе расчетных исследований по предложенной модели измельчения (1) как с учетом, так и без учета обмена энергией между компонентами смеси. Для характеристики прочностных свойств компонентов использовался коэффициент пропорциональности из энергетического закона измельчения Риттингера C_R [2].

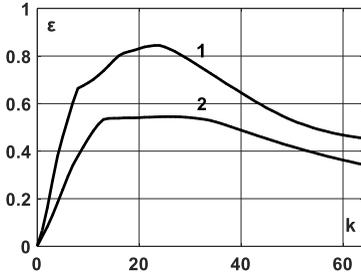


Рис. 1. Зависимость степени очистки компонентов смеси от времени процесса с учетом взаимного энергообмена между компонентами (кривая 1) и без его учета – (кривая 2), $C_{R1} / C_{R2} = 16,66$

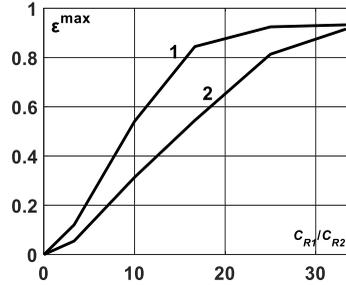


Рис. 2. Зависимость максимальных значений степени очистки ϵ^{\max} от относительной прочности компонентов смеси. Цифровые обозначение кривых аналогичны обозначениям на рис.1

Результаты расчетного анализа в виде зависимости степени очистки компонентов от времени процесса или числа актов разрушения представлены на рис. 1. Кривая 1 соответствует расчету измельчения с учетом обмена энергией между частицами разных компонентов, кривая 2 – без учета указанного обмена. Показатель степень очистки смеси при учете энергообмена достигает более высоких значений, что связано с более интенсивным подводом энергии за счет учета межкомпонентного обмена энергии по сравнению с отдельным моделированием измельчения компонентов. Анализ результатов показал, что расхождение расчетных значений степени очистки для моделей с учетом энергообмена и без его учета составляет до 35%.

На рис. 2 показаны результаты расчетного исследования зависимости максимальной степени очистки от относительной прочности компонентов.

В ходе исследований показана существенная погрешность в оценке степени очистки смеси без учета нелинейных эффектов, связанных с обменом энергии между компонентами. Полученные расчетные результаты позволяют проводить оценку возможности разделения любых компонентов смеси путем их совместного измельчения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №15-08-01684.

Литература

1. Ревнивцев В.И. Селективное разрушение минералов. – М.: Недра. 1988.

2. **Mizonov V.E., Zhukov V.P., Bernotat S.** Simulation of Grinding: New Approaches. – Ivanovo: ISPU Press. 1997.
3. **Жуков В.П., Беляков А.Н.** Моделирование совмещенных гетерогенных процессов на основе дискретных моделей уравнения Больцмана // Теор. основы хим. технологии. – 2017. – том 51. – №1. – С.78–84.

УДК 621.165

А.Е. БАРОЧКИН, к.т.н., доцент,
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор,
Н.Р.ЛЕЗНОВА, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Моделирование и анализ эффективности теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах

Аннотация: Предложено математическое описание многопоточных теплообменных аппаратов в виде системы линейных дифференциальных уравнений, найдено их аналитическое решение в виде зависимости температуры теплоносителей вдоль поверхности нагрева четырехпоточного аппарата, проанализированы решения для восьми возможных схем движения теплоносителей, найдена наиболее эффективная схема организации потоков с точки зрения минимизации тепловых потерь.

Ключевые слова: математическая модель, система дифференциальных уравнений, аналитическое решение, многопоточный аппарат, схема потоков, эффективность, тепловые потери.

A.E. BAROCHKIN¹, Candidate of Engineering, docent,
V.P. ZHUKOV¹, doctor of Engineering, professor,
N.R. LEZNOVA¹, Candidate of Engineering, docent,

¹ Ivanovo State Power Engineering University,
Rabfakovskaya 34, 153003 Ivanovo
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Modeling and analysis of efficiency of heat transfer in multi-flow heat exchangers

Abstract: The authors suggested the mathematical description of multithread heat exchangers as a system of differential equations, found their analytical solution to determine the dependence of heat-transfer agent temperature along the surface of the four-thread heat exchanger, analyzed solutions for the eight possible schemes of mutual movement of heat-transfer agents, found the most effective scheme of streams in terms of minimizing heat losses.

Key words: mathematical model, the system of differential equations, analytical solution, multi-threaded device, a flow diagram, efficiency, heat loss.

Из литературных источников [1] хорошо известно, что для двухпоточных теплообменных аппаратов противоточная схема движения теплоносителей более эффективна по сравнению с прямоточной схемой движения потоков. Ранее нами в рамках разработанной модели многопоточного теплообмена выполнен анализ схем движения теплоносителей в трехпоточном теплообменном аппарате [2]. В предлагаемом исследовании сделана попытка выявить наиболее эффективную схему движения потоков для четырехпоточных теплообменных аппаратов.

Из уравнения баланса энергии [2] для схемы движения четырех потоков движения теплоносителей записывается система четырех дифференциальных уравнений в матричном виде

$$\frac{d}{dF} \mathbf{T} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{T}, \quad (1)$$

где матрица искомых температур теплоносителей \mathbf{T} и матрица коэффициентов \mathbf{A} для варианта схемы рис.1, записываются в виде:

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -a_1 & a_1 & 0 & 0 \\ a_2 & -(a_2 + a_3) & a_3 & 0 \\ 0 & a_4 & -(a_4 + a_5) & a_5 \\ 0 & 0 & a_6 & -a_6 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $a_1 = K_{12} / (c_1 \cdot G_1)$, $a_2 = K_{12} / (c_2 \cdot G_2)$, $a_3 = K_{23} / (c_2 \cdot G_2)$, $a_4 = K_{23} / (c_3 \cdot G_3)$, $a_5 = K_{34} / (c_3 \cdot G_3)$, $a_6 = K_{34} / (c_4 \cdot G_4)$, F – площадь поверхности теплообмена; c – удельная теплоемкость; K – коэффициент теплопередачи; G – расход теплоносителя; одинарный индекс показывает номер теплоносителя, двойной индекс коэффициента теплопередачи соответствует номерам двух теплоносителей, между которыми происходит теплопередача.

Общее решение системы однородных дифференциальных уравнений первого порядка (1) ищется в виде[3]:

$$\mathbf{T} = \sum_{j=1}^4 C_j \cdot \boldsymbol{\alpha}^j \cdot e^{\lambda_j \cdot F}, \quad (3)$$

где λ – собственные числа, $\boldsymbol{\alpha}$ – собственные векторы матрицы \mathbf{A} , C – постоянные интегрирования. При заданных начальных условиях $F=0, t_{10} = 100, t_{20} = t_{30} = t_{40} = 0$ и $a_1 = a_2 = a_3 = a_4 = 1$ получено частное решение системы (1) для схемы рис.1,а, результаты которого представлены в виде зависимости изменения температуры вдоль поверхности нагрева для четырех теплоносителей. Для каждой из восьми возможных схем движения потоков теплоносителей, представленных на

рис. 1, составлены по аналогии с (1) – (2) системы линейных дифференциальных уравнений. Результаты решения для каждой из восьми схем представлены также на рис. 1 в виде графиков изменения температуры теплоносителей вдоль поверхности нагрева.

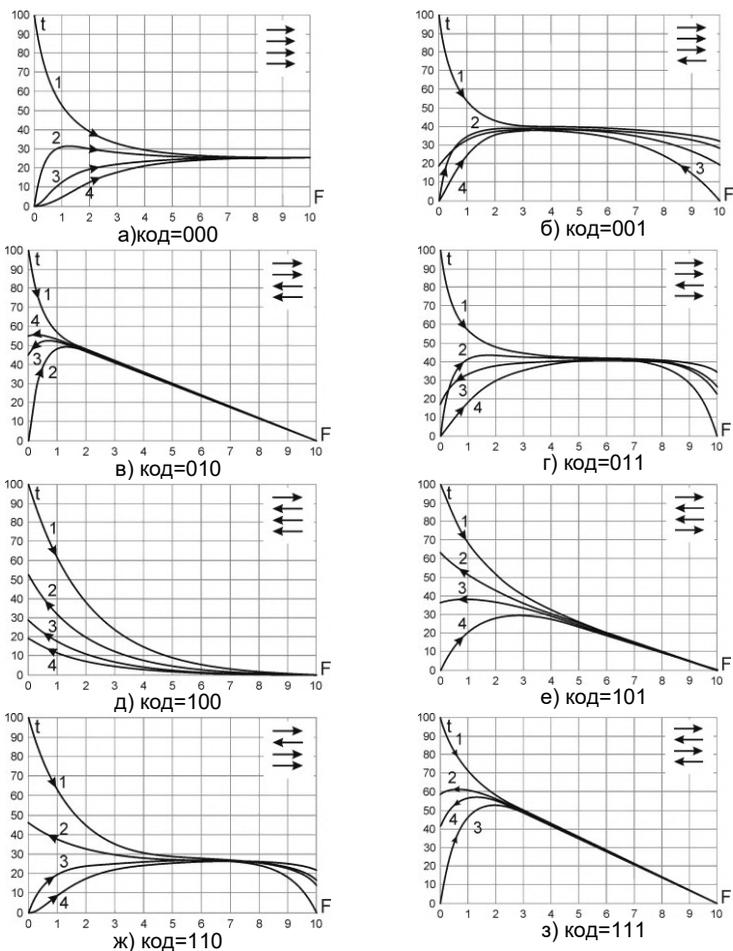


Рис. 1. Графики изменения температуры четырех теплоносителей вдоль поверхности нагрева для восьми вариантов схем движения потоков теплоносителей, показанных стрелками на поле графика. Цифра на поле графика показывает номер теплоносителя. Каждая цифра двоичного кода структуры соответствует: 0–для прямотока двух соседних теплоносителей; 1–для противотока

В качестве критерия эффективности теплообмена при сопоставлении схем движения выбрана температура горячего теплоносителя на выходе, что в случае сброса данного теплоносителя в атмосферу определяет минимальное тепловое загрязнение окружающей среды. Выполненный расчетный анализ показал, что наиболее эффективная схема организации движения потоков соответствует коду 100, которая позволяет обеспечить минимальное значение температуры горячего теплоносителя на выходе из аппарата при минимальном значении площади поверхности теплообмена.

Литература

1. **Исаченко В.П.**, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. Теплопередача. – М.: Энергоатомиздат, 1981.
2. **Барочкин, А.Е.**, Жуков В.П. Беляков А.Н. Исследование процесса теплопередачи в многопоточных теплообменных аппаратах // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2011. – Т.54. – N.11. – С.116-119.
3. **Власов В.Г.** Конспект лекций по высшей математике. – М.: Айрис, 1996.

УДК 621.928

В.А. ОГУРЦОВ, д.т.н., профессор,
А.П. АЛЕШИНА, к.т.н., ст. преп.,
А.В. ОГУРЦОВ, к.т.н., ассистент,
М.А. ГРИЦЕНКО, аспирант

Ивановский государственный политехнический университет
153023 г. Иваново, ул. 8 марта, д.20.
E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

К расчету вероятности проникновения частиц через отверстия сита вибрационного грохота

Аннотация. Предложена имитационная модель процесса прохождения частицы через отверстие сита, которое совершает колебания в вертикальной или горизонтальной плоскости с различными амплитудами и частотами, реализованная с помощью программы Autodesk 3ds Max. Определена вероятность беспрепятственного проникновения частицы через просеивающую поверхность при однократном соударении с ней в зависимости от размеров частицы и параметров колебаний сита грохота.

Ключевые слова: вероятность, вибрационный грохот, просеивающая поверхность, компьютерный эксперимент

V.A. OGURTZOV, Doctor of Engineering, professor,
A.P. ALESHINA, Candidate of technical Sciences, senior lecturer,
A.V. OGURTZOV, Candidate of technical Sciences, assistant,
M.A. GRITZENKO, PhD student
Ivanovo State Polytechnic University
8-Marta, 20, 153023, Ivanovo
E-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

Calculation of probability of particles penetration through a sieve of vibration screen

Abstract. An imitation model of the passage of particles through the sieve holes, which oscillate in vertical or horizontal plane with different amplitudes and frequencies based on Autodesk 3ds Max is proposed. The probability of particle penetration through the screening surface after a single collision with it is found as a function of particle size and parameters of screen oscillation.

Key words: probability, vibrating screen, screening surface, computer experiment

Эффективность грохочения определяет потребительские свойства продуктов классификации. Так как просеивающая поверхность имеет ограниченные габариты, и время нахождения частиц сыпучего материала на сите промышленного грохота тоже ограничено, то не все мелкие частицы успевают попасть в подситовое пространство. Доля частиц проходящих через сито зависит от числа соударений мелких частиц с просеивающей поверхностью за время нахождения их на грохоте и от вероятности прохождения отдельной частицей отверстия сита при одном соударении с ним.

Моделируя процесс проникновения частиц через отверстия сита грохота большинство авторов принимают направления ударов частиц о поверхность сита перпендикулярными к ней. Тогда вероятность беспрепятственного прохождения шарообразной частицы через отверстие сита при одном соударении определится по формуле Годена – Андреева [1]

$$p_f = \varphi(1 - \delta/D)^2, \quad (1)$$

где φ – коэффициент живого сечения сита; δ – диаметр частицы; D – размер отверстия сита. Для квадратной формы отверстий коэффициент живого сечения

$$\varphi = D^2/(D+d)^2, \quad (2)$$

где d – диаметр проволоки сита. Таким образом, в отверстие сита пройдут только те частицы, центры которых находятся внутри квадрата $(D - \delta) \times (D - \delta)$.

Однако угол атаки частицами поверхности сита в момент соударения зависит от направления вектора скорости частицы и направления векторов скоростей точек сита, определяемых параметрами его колебаний. Описать такую зависимость математически весьма сложно. Поэтому в данной работе предлагается имитационная модель процесса проникновения частицы через отверстие сита, которое совершает колеба-

ния в вертикальной или горизонтальной плоскости с различными амплитудами и частотами, реализованная с помощью программы Autodesk 3ds Max [2].

Рассмотрим пример такого моделирования. Частица диаметром 3 мм, положение которой над ситом задавалось случайным образом, двигалась по закону свободного полета к сити, которое совершало колебательное движение. Размер отверстия сита составлял 5 мм, диаметр проволоки – 1 мм. По рис. 1, на котором представлено изменение вертикальной координаты падения частицы от времени, проверялось наличие или отсутствие соприкосновения частицы с проволокой сита.

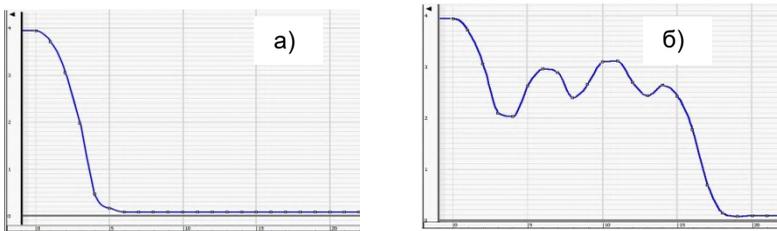


Рис. 1. Изменение вертикальной координаты от времени:
а) частица не соприкасалась с ситом; б) частица соприкасалась с ситом

Вероятность прохождения частицы через просеивающую поверхность определялась как отношение числа опытов, когда частица не задевала проволоку, к общему числу опытов.

Для сокращения времени компьютерных экспериментов в одном опыте над ситом располагалось 100 частиц, положение которых задавалось случайным образом (рис. 2,а). Подсчитывалось количество частиц, свободно прошедших отверстия сита и задевших за проволоку (рис. 2,б). При фиксированных значениях размера частицы, частоты и амплитуды колебаний сита менялось начальное положение частиц. Опыты прекращались тогда, когда вероятность беспрепятственного проникновения частиц через сито становилась практически постоянной.

На рис. 3 представлена зависимость вероятности проникновения частиц через сито от их крупности. Кривая 1, рассчитанная по уравнению (1), соответствует неподвижному сити. Ломанная кривая 2 построена с помощью имитационной модели процесса проникновения частиц через сито, совершающего круговые колебания в вертикальной плоскости. Ломанная кривая 3 соответствует случаю, когда сито совершает круговые колебания в горизонтальной плоскости. Амплитуда вертикальных и горизонтальных колебания – 2 мм, частота – 70 с⁻¹.

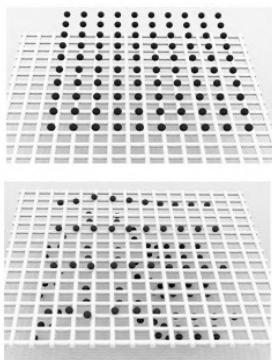


Рис. 2. Компьютерный эксперимент:

а – начальное положение частиц;
б – конечное положение частиц

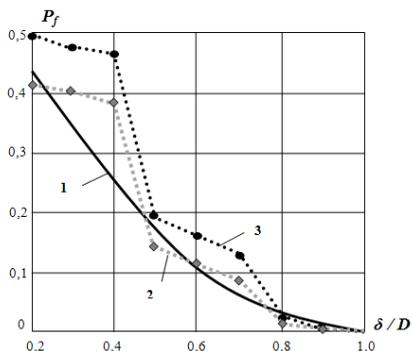


Рис. 3. Зависимость вероятности проникновения частиц через сито от их крупности

Результаты компьютерных экспериментов показали, что вероятности проникновения частиц через отверстия сита при одном соударении, когда сито неподвижно или совершает колебания, могут существенно отличаться. Учет подвижности сита при определении скорости проникновения частиц через просеивающую поверхность повышает точность расчета кинетики грохочения.

Литература

1. Процессы сепарации частиц в виброоживленном слое: моделирование, оптимизация, расчет / В.Е. Мизонов, В.А. Огурцов, С.В. Федосов, А.В. Огурцов; Иван. гос. энерг. ун-т; Иван. гос. арх – строит. ун-т. – Иваново, 2010. – 192 с.
2. Zhao, L., Zhao, Y., Liu, C., Li, J., Dong, H. Simulation of screening process on a circularly vibrating screen using 3D-DEM // Mining Science and Technology, V. 21, Issue 5, 2011, pp. 677-680.

УДК517.98

И.В. ТОМИНА, к.ф.-м.н., доцент, Н.Г. ТОМИН, к.ф.-м.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

E-mail: ivtomina@gmail.com¹, nikolay.tomin@gmail.com²

О полных ортонормированных системах функций на многомерных симметричных областях

Аннотация: Пусть область G в R^d разделена гиперплоскостью l на симметричные друг другу относительно l области G_1 и G_2 . По любым двум, не обяза-

тельно различным ортонормированным полным системам (ОНПС) в $L^2(G_1)$ строится ОНПС в $L^2(G)$, по которой эти ОНПС однозначно восстанавливаются.

Ключевые слова: область, симметрия, ортонормированная полная система.

I.V. TOMINA, Candidate of Physics and Mathematics, docent
N.G. TOMIN, Candidate of Physics and Mathematics, docent

IvanovoStatePowerEngineeringUniversity
153003 Ivanovo, RabfakovskayaSt., 34
E-mail: ivtomina@gmail.com¹, nikolay.tomin@gmail.com²

On complete orthonormal systems of functions on multidimensional symmetric domains

Abstract: Let a domain $G \subset R^d$ be divided by a hyperplane l into domains G_1 and G_2 that are symmetric to each other with respect to l . For any two, not necessarily different orthonormal complete systems (ONCS) in $L^2(G_1)$ a certain ONCS in $L^2(G)$ is constructed, according to which these ONCS are uniquely reconstructed.

Key words: domain, symmetry, orthonormal complete system.

Пусть $d \in N$, $G = G_1 \cup G_2$, где G_1 и G_2 – замкнутые области в R^d с гладкой или кусочно-гладкой границей, симметричные друг другу относительно гиперплоскости l лежащие в различных замкнутых полупространствах с границей l . Для любой точки M из G через M' будем обозначать точку, симметричную точке M относительно гиперплоскости l . Пусть (\cdot, \cdot) и $\|\cdot\|$ – скалярное произведение и норма в $L^2(G)$, $(\cdot, \cdot)_j$ и $\|\cdot\|_j$ – скалярное произведение и норма в $L^2(G_j)$, $j=1,2$.

Теорема 1. Пусть $E = \{e_m\}_{m=1}^\infty$, где $\forall m \in N$ при п.в. $M \in G$ имеем

$$e_m(M') = (-1)^m e_m(M), \quad (1)$$

то есть функция e_m при четном m симметрична, а при нечетном m – антисимметрична относительно l .

Тогда следующие утверждения равносильны:

- 1) E – ортогональная полная система в $L^2(G)$;
- 2) $E_0 = \{e_{2k}\}_{k=1}^\infty$ и $E_1 = \{e_{2k-1}\}_{k=1}^\infty$ – ортогональные полные системы в $L^2(G_j)$ при некотором или, что то же самое, при любом $j=1,2$.

При этом для $j=1,2$ и всех $m \in N$ справедливо равенство

$$\|e_m\| = \sqrt{2} \|e_m\|_j. \quad (2)$$

Доказательство. Из (1) и свойств интегралов от симметричных и антисимметричных функций для $j=1,2$ и всех натуральных m и n следует

$$(e_m, e_n) = (-1)^{m+n} (e_m, e_n) = [(-1)^{m+n} + 1](e_m, e_n)_j. \quad (3)$$

В частности, при $m=n$ из (3) получаем (2).

Пусть выполняется утверждение 1). Тогда для неравных m и n одинаковой четности из (3) и ортогональности E в $L^2(G)$ находим $(e_m, e_n)_j = (e_m, e_n) / 2 = 0$. Таким образом, каждая из систем E_0 и E_1 ортогональна в $L^2(G_j)$ при любом $j=1,2$. Проверим полноту E_i в $L^2(G_j)$. Пусть $i=0$ или $i=1$, $j \in \{1,2\}$, $g \in L^2(G_j)$ и $(g, e_m)_j = 0 \quad \forall e_m \in E_i$. Требуется доказать, что $g=0$ в $L^2(G_j)$, то есть $g=0$ п.в. на G_j . После продолжения g с G_j на G по симметричности при $i=0$ или по антисимметричности при $i=1$ находим, что функция $g e_m$ симметрична при четном $m+i$ и антисимметрична при нечетном $m+i$.

Отсюда аналогично (3) получаем

$$(g, e_m) = [(-1)^{m+i} + 1](g, e_m)_j \quad \forall m \in N.$$

Так как при четном $m+i$ в силу соотношения $e_m \in E_i$ имеем $(g, e_m)_j = 0$, а при нечетном $m+i$ в 0 обращается множитель $(-1)^{m+i} + 1$, то $(g, e_m) = 0 \quad \forall m \in N$.

Из полноты E в $L^2(G)$ следует $g=0$ п.в. на G и на G_j .

Докажем, что из утверждения 2) следует утверждение 1).

Пусть системы E_0 и E_1 ортогональны и полны в $L^2(G_j)$ при $j=1$ или $j=2$. При m и n разной четности в 0 обращается $(-1)^{m+n} + 1$, а при различных четных (нечетных) m и n в силу ортогональности E_0 (соответственно E_1) в $L^2(G_j)$ – число $(e_m, e_n)_j$. Из (3) следует $(e_m, e_n) = 0$ при $m \neq n$, так что система E ортогональна в $L^2(G)$. Остается доказать полноту E в $L^2(G)$. Пусть $f \in L^2(G)$ и $(f, e_m) = 0 \quad \forall m \in N$. При $i=0,1$ введем на G функции $f_i(M) = [f(M) + (-1)^i f(M')]/2$. Тогда получаем

$f = f_0 + f_1$, причем f_0 – симметричная, а f_1 – антисимметричная относительно функции. Поэтому $f_i \overline{e_m}$ симметрична и антисимметрична соответственно при четном и нечетном $m+i$, откуда при четных $m+i$ имеем $(f, e_m) = (f_0, e_m) + (f_1, e_m) = (f_i, e_m) = 2(f_i, e_m)_j$. Так как по условию $(f, e_m) = 0 \quad \forall m \in N$, то $(f_i, e_m)_j = 0$ при всех m и i одинаковой четности. При $i=0,1$ из полноты E_i в $L^2(G_j)$ следует $f_i=0$ п.в. на G_j и на G . Поскольку $f = f_0 + f_1$, то $f=0$ п.в. на G . Таким образом, E полна в $L^2(G)$. Теорема доказана.

Замечание 1. Теорема 1 позволяет по любой ортонормированной полной системе (ОНПС) в $L^2(G)$, состоящей из бесконечного числа симметричных и бесконечного числа антисимметричных относительно l функций, построить для любого $j=1,2$ соответствующую пару (возможно, совпадающих) ОНПС в $L^2(G_j)$. Другой способ такого построения для некоторого класса ОНПС в частном случае квадрата G на евклидовой плоскости, состоящего из двух равнобедренных прямоугольных треугольников G_1 и G_2 , приведен в статье [1].

Замечание 2. Пусть $E_0 = \{u_m\}_{m=1}^\infty$ и $E_1 = \{v_m\}_{m=1}^\infty$ – произвольные (возможно, совпадающие) ОНПС в $L^2(G_1)$. Для каждого $m \in N$ построим на G две функции по следующему правилу: $\forall M \in G_1$ полагаем $\hat{u}_m(M) = \hat{u}_m(M') = u_m(M) / \sqrt{2}$, $\hat{v}_m(M) = -\hat{v}_m(M') = v_m(M) / \sqrt{2}$. Тогда по теореме 1 получаем, что $\hat{E} = \{\hat{u}_1, \hat{v}_1, \hat{u}_2, \hat{v}_2, \dots\}$ есть ОНПС в $L^2(G)$. Например, так как есть ОНПС в $L^2(0, \pi)$, то $\{\sqrt{1/\pi} \sin x, \sqrt{1/\pi} \sin |x|, \sqrt{2/\pi} \sin mx\}_{m=1}^\infty, \sqrt{1/\pi} \sin 2x, \sqrt{1/\pi} \sin 2|x|, \dots\}$ есть ОНПС в $L^2(-\pi, \pi)$.

Литература

1. **Томина, И.В.** Об одном способе построения ортонормированных полных систем на прямоугольном равнобедренном треугольнике / И.В. Томина // Математика и ее приложения. Журн. Иванов. матем. об-ва. – 2001. – Вып. 1. – С. 119-122.

УДК 517.53

Б.С. ЗИНОВЬЕВ, к.ф.-м.н., доцент,
М.П. КОРОЛЕВА, к.ф.-м.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: koroleva@emf.ispu.ru

Интегральные формулы с ядром Сеге для лакунарных рядов для круга

Аннотация. Найдены воспроизводящие ядра Сеге для лакунарных рядов для круга.
Ключевые слова: интеграл, формула, Сеге, лакунарный ряд.

B.S. ZINOVEV, candidate of physical and mathematical sciences, docent,
M.P. KOROLEVA, candidate of physical and mathematical sciences, docent,

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: koroleva@emf.ispu.ru

Integral formula with the core Sege for lacunary series for the circle

Abstract. It was found a reproducing kernel Sege for the lacunary series for a circle.
Key words: integral, formula, Sege, lacunary series.

Рассмотрим круг

$$u(0, R) = \{z : |z| < R\} \subset C^1$$

и класс голоморфных в замыкании $\overline{u(0, R)}$ функций в виде степенного ряда

$$f(z) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} a_{\alpha} z^{\alpha}.$$

Хорошо известна воспроизводящая интегральная формула для круга

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{|\zeta|=R} f(\zeta) \frac{R^2}{R^2 - z\bar{\zeta}} \frac{d\zeta}{\zeta}, \quad z \in u(0, R)$$

с ядром Сеге

$$h(z\bar{\zeta}) = \frac{R^2}{R^2 - z\bar{\zeta}}.$$

Эта формула восстанавливает значения функции $f(z)$ внутри круга по ее значениям на границе круга.

Рассмотрим класс функций в виде лакунарных рядов вида

$$f(z) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} a_{\alpha} z^{p\alpha}, \quad p=1, 2, \dots$$

(Лакунарные ряды – это ряды с пропусками.)

Найдено для этого класса функций воспроизводящее ядро Сеге $h(z\bar{\zeta})$ также в виде лакунарного ряда

$$h(z\bar{\zeta}) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} b_{\alpha} (z\bar{\zeta})^{p\alpha}, \quad p=1, 2, \dots$$

и в замкнутом виде

$$h(z\bar{\zeta}) = \frac{R^{2p}}{R^{2p} - (z\bar{\zeta})^p}.$$

Тогда

$$f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{|\zeta|=R} f(\zeta) \frac{R^{2p}}{R^{2p} - (z\bar{\zeta})^p} \frac{d\zeta}{\zeta}.$$

Пример. Пусть $p=2$ и

$$f(z) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} \frac{z^{2\alpha}}{(2\alpha)!} = \operatorname{ch} z.$$

Для этого случая ядро Сеге имеет вид

$$h(z\bar{\zeta}) = \frac{R^4}{R^4 - (z\bar{\zeta})^2}.$$

Для функций вида

$$f(z) = \sum_{\alpha=0}^{\infty} a_{\alpha} z^{\alpha p+m}, \quad m=0, 1, \dots$$

ядро Сеге имеет вид

$$h(z\bar{\zeta}) = \left(\frac{z\bar{\zeta}}{K^2} \right)^m \frac{R^{2p}}{R^{2p} - (z\bar{\zeta})^p}.$$

Литература

1. **Шабт Б.В.** Введение в комплексный анализ, ч.1 / Б.В.Шабт. – Ф.М., Москва, 1976.
2. **Зиновьев Б.С.** Избранные вопросы теории голоморфных функций одного комплексного переменного / Б.С. Зиновьев, Д.И. Коровин, Ю.И. Масляков. – Иваново, ИГЭУ, 2013.
3. **Зиновьев Б.С.** Элементы комплексного анализа, теория и практика / Б.С. Зиновьев. – Иваново, ИГЭУ, 2014.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: aks.aks.77@mail.ru

Интегральные формулы для неограниченной двояко-круговой области

Аннотация: получены интегральные представления голоморфной функции для некоторой неограниченной двояко-круговой области с ядрами Сеге и Бергмана.

Ключевые слова: двояко-круговая область, ядро Сеге, ядро Бергмана.

B. S. ZINOV'EV, candidate of physical and mathematical Sciences,
associate Professor,
L. N. AKSAKOVSKAYA, candidate of technical Sciences,
associate Professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: aks.aks.77@mail.ru

Integral formula for unlimited in the two ways circular area

Abstract: we obtain an integral representation of holomorphic functions for some unlimited in two ways-the circular area with the nuclei of the Szego and Bergman.

Key words: doubly-circular region, nuclei of the Szego and Bergman.

Рассмотрим неограниченную полную двояко-круговую область в C^2 :

$$D = \left\{ z : |z_2|^2 < 2|\ln|z_1|| \right\}.$$

Зададим на ориентированной границе $|\partial D|$ меру $d\mu_1 = -d|\xi_1|^2$ в интегральной формуле

$$f(z) = \frac{1}{(2\pi i)^2} \int_{|\partial D|} d\mu_1 \int_{\Delta_{|\xi|}} f(\xi) h_1(z, \bar{\xi}) \frac{d\xi}{\xi}$$

с ядром Сеге $h(z, \bar{\xi}) = h(z_1, \bar{\xi}_1, z_2, \bar{\xi}_2) \in H(\bar{D})$.

Тогда ядро Сеге имеет вид
$$h_1(z, \bar{\xi}) = \frac{e^{z_2 \bar{\xi}_2}}{\left(1 - z_1 \bar{\xi}_1 e^{z_2 \bar{\xi}_2}\right)^2}.$$

Это ядро найдено Л.А. Айзенбергом опубликовано в книге [2].

Если задать на границе $|\partial D|$ меру $d\mu_2 = -d|\xi_2^\xi|^2$, то ядро Се-

$$ге $h(z\bar{\xi})$ по этой мере будет иметь вид [3] $h_2(z\bar{\xi}) = \frac{z_1\bar{\xi}_1 e^{z_2\bar{\xi}_2}}{(1 - z_1\bar{\xi}_1 e^{z_2\bar{\xi}_2})^2}$.$$

Далее зададим на $|\bar{D}|$ меру $d\lambda = d|\xi_1^\xi|^2 d|\xi_2^\xi|^2$ в интегральной формуле $f(z) = \frac{1}{2\pi i} \int_{|\partial D|} d\lambda \int_{\Delta_{|\xi|}} f(\xi) K(z\bar{\xi}) \frac{d\xi}{\xi}$ для $f(z) \in H(\bar{D})$, где

$K(z\bar{\xi})$ – ядро Бергмана.

Доказывается, что ядро Бергмана $K(z\bar{\xi})$ по этой мере имеет вид

$$K(z\bar{\xi}) = \frac{e^{z_2\bar{\xi}_2} (1 + z_1\bar{\xi}_1 e^{z_2\bar{\xi}_2})}{(1 - z_1\bar{\xi}_1 e^{z_2\bar{\xi}_2})}, \text{ причем } K(x) = \frac{\partial}{\partial x_2} h_1(x) = \frac{\partial}{\partial x_1} h_2(x),$$

где $x_i = z_i\bar{\xi}_i$, $i = 1, 2$.

Интегральные формулы с ядром Сега восстанавливают голоморфную в $|\bar{D}|$ функцию $f(z)$ по её значениям на границе. Интегральные формулы с ядром Бергмана восстанавливают голоморфную в $|\bar{D}|$ функцию $f(z)$ по её значениям в $|\bar{D}|$. Данные формулы могут иметь практическое применение.

Литература

1. Шабат Б.В. Введение в комплексный анализ. Ч.2. – М.: Наука. 1979.
2. Фукс Б.А. Введение в теорию аналитических функций многих комплексных переменных. – М.: Наука. 1962.
3. Избранные вопросы теории голоморфных функций многих комплексных переменных / Б.С. Зиновьев, ИГЭУ.– Иваново. 2012.
4. Интегральные формулы для кратно-круговых областей / Б.С. Зиновьев, ИГЭУ.– Иваново. 2015.

УДК 620.193.4

Л.Н.АКСАКОВСКАЯ, к.т.н., доцент,
Б.С. ЗИНОВЬЕВ, к.ф.м.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: aks.aks.77@mail.ru

Расчет концентрации переносимого компонента в процессе коррозии бетона

Аннотация: выведенная формула позволяет определять среднее по толщине конструкции значение концентрации переносимого компонента (гидроксида кальция) за малый временной интервал (малые значения временного критерия Fo_m).

Ключевые слова: преобразование Лапласа, концентрация, дифференциальное уравнение массопроводности.

L. N. AKSAKOVSKAYA, candidate of technical Sciences, ass. Professor,
B. S. ZINOV'EV, candidate of physical and mathematical Sciences., ass. Professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: aks.aks.77@mail.ru

The calculation of the concentration of the transferred component in the process of concrete corrosion

Abstract: the definition of the mean concentration of the transferred component (calcium hydroxide) for a small time interval.

Keywords: Laplace transform, concentration, differential equation of mass transport.

В безразмерном виде задача диффузии свободного гидроксида кальция из оболочки железобетонного резервуара в замкнутый объем жидкости определяется дифференциальным уравнением массопроводности с соответствующими граничными и начальными условиями[1]:

$$\frac{\partial z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2}; Fo_m \geq 0; 0 \leq \bar{x} \leq 1; z(\bar{x}, 0) = 0;$$
$$\frac{\partial z(0, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = 0; \quad \frac{1}{Bi_m} \cdot \frac{\partial z(1, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = [z_p(Fo_m) - z(1, Fo_m)].$$

Приняты следующие обозначения: $\bar{x} = \frac{x}{\delta}$; $Fo_m = \frac{k\tau}{\delta^2}$;

$$z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{C_0 - C(x, \tau)}{C_0}; \quad Bi_m = \frac{\beta\delta}{k}; \quad z_p(Fo_m) = \frac{C_0 - mC_{oc}(\tau)}{C_0}; \quad \text{здесь}$$

$C(x, \tau)$ – концентрация свободного оксида кальция в бетоне в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , кг/кг; C_0 – начальная концентрация оксида кальция, кг/кг; δ – толщина стенки резервуара, м; k – коэффициент массопроводности, м²/с; β – коэффициент массоотдачи в жидкой среде, м/с; $C_{oc}(\tau)$ – концентрация свободного CaO в жидкой среде в момент времени τ , кг/кг.

Решение краевой задачи методом преобразований Лапласа приведено в работах [1] и [2] и имеет вид:

$$\frac{z(\bar{x}, Fo_m)}{z_{oc}(0)} = -\frac{Bi_m}{a_2 - a_1} \sum_{i=1}^2 (-1)^i e^{-a_i(1-\bar{x}) + a_i Fo_m} \operatorname{erfc}\left(\frac{1-\bar{x}}{2\sqrt{Fo_m}} - a_i\sqrt{Fo_m}\right),$$

здесь a_1, a_2 – корни квадратного уравнения $a^2 - 4 \cdot b = 0$; $a = Bi_m$; $b = Bi_m \cdot K_m$; $z_{oc}(Fo_m)$ – «безразмерная концентрация переносимого компонента»; K_m – коэффициент, учитывающий характеристики фаз.

Среднее значение концентрации переносимого компонента определит-

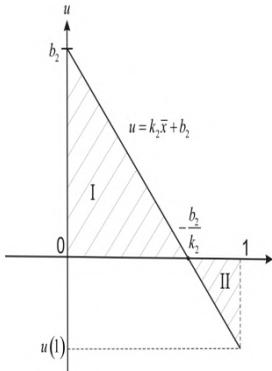
ся выражением
$$z_{\bar{x}}(Fo_m) = \int_0^1 z(\bar{x}, Fo_m) d\bar{x}.$$

Если исключить из рассмотрения числовые коэффициенты и знак суммирования, т.к. они не оказывают решающего влияния на результат интегрирования, то общий вид интеграла такой:

$$\begin{aligned} \int_0^1 e^{k_1\bar{x}+b_1} \operatorname{erfc}(k_2\bar{x}+b_2) d\bar{x} &= \int_0^1 e^{k_1\bar{x}+b_1} \cdot \left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{k_2\bar{x}+b_2} e^{-u^2} du\right) d\bar{x} = \\ &= \int_0^1 e^{k_1\bar{x}+b_1} d\bar{x} - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^1 e^{k_1\bar{x}+b_1} \left[\int_0^{k_2\bar{x}+b_2} e^{-u^2} du \right] d\bar{x}, \text{ где } k_1 = a_i; \\ b_1 &= a_i Fo_m - a_i; \quad k_2 = -\frac{1}{2Fo_m} < 0; \quad b_2 = \frac{1-2a_i Fo_m}{2\sqrt{Fo_m}} > 0, \quad a_i < 0. \end{aligned}$$

Первый интеграл: $\frac{1}{k_1}(e^{k_1+b_1} - e^{b_1})$. Во втором интеграле область интегрирования на отрезке $\bar{x} \in [0;1]$ ограничена прямой $u = k_2\bar{x} + b_2$, $u(1) = k_2 + b_2 = (\sqrt{Fo_m} - 1 - 2a_i Fo_m \sqrt{Fo_m}) / (2Fo_m) < 0$.

Область интегрирования состоит из частей I и II, тогда при смене порядка интегрирования будет равен сумме интегралов по областям I и II. По области I (аналогично получается результат по области II):



$$\int_0^{b_2} du \int_0^{k_2} e^{-u^2 + k_1\bar{x} + b_1} d\bar{x} = -\frac{1}{k_1} e^{b_1} \int_0^{b_2} e^{-u^2} du + \frac{1}{k_1} e^{-\frac{b_1 k_2 - k_1 b_2}{k_2} + \frac{k_1^2}{4k_2^2}} \left[\int_0^{b_2} e^{-\left(u - \frac{k_1}{2k_2}\right)^2} d\left(u - \frac{k_1}{2k_2}\right) \right]$$

Сложим результаты интегрирования по I и II:

$$\frac{1}{k_1}(e^{k_1+b_1} - e^{b_1}) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left[\frac{1}{k_1} e^{-\frac{b_1 k_2 - k_1 b_2}{k_2} + \frac{k_1^2}{4k_2^2}} \left(\int_0^{b_2} e^{-\left(u - \frac{k_1}{2k_2}\right)^2} d\left(u - \frac{k_1}{2k_2}\right) + \int_0^{k_2+b_2} e^{-\left(u - \frac{k_1}{2k_2}\right)^2} d\left(u - \frac{k_1}{2k_2}\right) \right) - \frac{1}{k_1} e^{b_1} \int_0^{b_2} e^{-u^2} du - \frac{1}{k_1} e^{k_1+b_1} \int_0^{k_2+b_2} e^{-u^2} du \right].$$

Окончательно

$$z_{\bar{n}\bar{d}}(Fo_m) = -\frac{Bi_m}{a_2 - a_1} \sum_{i=1}^2 (-1)^2 \cdot \frac{1}{k_{1i}} \left[(e^{k_{1i}+b_{1i}} - e^{b_{1i}}) - e^{-\frac{b_{1i}k_{2i} - k_{1i}b_{2i}}{k_{2i}} + \frac{k_{1i}^2}{4k_{2i}^2}} \left(\operatorname{erf}\left(b_{2i} - \frac{k_{1i}}{2k_{2i}}\right) - 2\operatorname{erf}\left(-\frac{k_{1i}}{2k_{2i}}\right) + \operatorname{erf}\left(k_{2i} + b_{2i} - \frac{k_{1i}}{2k_{2i}}\right) \right) - e^{b_{1i}} \operatorname{erf}(b_{2i}) - e^{k_{1i}+b_{1i}} \cdot \operatorname{erf}(k_{2i} + b_{2i}) \right].$$

Литература

1. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Федосова Н.Л. и др. Моделирование массопереноса в процессах жидкостной коррозии бетона первого вида // Строит. материалы, 2005, №7, с. 60-62.
2. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Аксаковская Л.Н., Хрунов В.А. Моделирование массопереноса в процессах коррозии бетонов первого вида (малые значения числа Фурье) // Строит. материалы, 2007, №5, с. 70-71.

УДК 621.927

Н.Н. ЕЛИН, д.т.н., профессор,
МАКАРЫЧЕВ А.Ф., аспирант
Ивановский государственный политехнический университет
153003 г. Иваново, пр. Шереметьевский 21
e-mail: yelinnn@mail.ru; exquler@ya.ru

Моделирование и оптимизация термической очистки емкостей от остатков тяжелых нефтепродуктов

Аннотация: Построена математическая модель процесса пропарки емкостей для хранения нефтепродуктов и выполнена ее компьютерная реализация в программной среде ANSYS, позволяющая проводить вычислительные эксперименты с целью выявления рациональных параметров подачи пара.

Ключевые слова: Емкость, нефтепродукт, водяной пар, пропарка, тепло-массоперенос, модель, гидродинамика.

N.N. YELIN, Doctor of Engineering, professor,
A.F. MAKARYCHEV, postgraduate student
Ivanovo State Polytechnic University
153000 Ivanovo, Sheremetievskiy Av. 21
e-mail: yelinnn@mail.ru; exquler@ya.ru

Modeling and optimization of thermal cleaning of tanks from residues of heavy oil products

Abstract: A mathematical model of the process of steaming containers for the storage of petroleum products and its computer realization performed in ANSYS software environment, allowing carrying out computational experiments to identify the parameters of rational supply of steam.

Keywords: Capacity, petroleum, steam, steaming, heat and mass transfer, model, hydrodynamics.

Основным способом борьбы с отложениями тяжелых фракций нефтепродуктов в стальных резервуарах является их пропаривание – физически сложный энергоемкий процесс [1], поиск оптимальных режимов которого на основе компьютерного моделирования представляет собой актуальную научную и практическую задачу [2-4].

Математическая модель данного процесса построена в программной среде ANSYS(ANSYSInc.) [5] на основании решения сопряженной задачи тепломассообмена в системе «водяной пар - пленка нефтепродукта - стальная стенка емкости - окружающая среда» при заданной динамике подачи пара, его параметров, теплофизических и реологических свойств нефтепродукта и параметров окружающей среды. Создание геометрической модели нефтяной емкости происходило в Rhinoceros 3D путем построения конечно-элементной расчетной сетки, сформированной из 3 расчетных доменов, в модуле ANSYSMeshing. При регенерации расчетной сетки использованы hexa/prism элементы, наиболее точно описывающие геометрию емкости, при этом был подобран минимальный размер сетки, что позволило нам учесть особенности движения пара и удаляемого вещества по стенкам цистерны, так же для оптимизации сетки использована функция VirtualTopology.

Расчеты производились в ANSYSFLUENT с модулем VOF (Volumefraction) при подаче 1,44 т/час перегретого пара давлением 0,12 МПа и температурой 280 °С в железнодорожную цилиндрическую цистерну марки 15-1566-06, предназначенную для перевозки вязких нефтепродуктов. Так как модель цистерны не «закреплена» в пространстве, можно исследовать влияние её ориентации на параметры процесса.

Нефтепродукт рассматривался как неньютоновская среда, подчиняющаяся закону Шведова-Бингама [6], а при расчетах кинетики процесса использовались известные положения теории тепломассообмена. Вычислительный процесс организован таким образом, что для каждого момента времени, отделяемого от предыдущего момента выбранным шагом, рассчитываются необходимые параметры такие как: температуры в системе, давление насыщения и парциальное давление пара в емкости, для пленки нефтепродукта на стенках цистерны рассчитываются средние по высоте теплофизические параметры (вязкость, напряжение сдвига, плотность, теплопроводность). Расчет прекращается, когда толщина пленки нефтепродукта становится минимально возможной.

Цель нашей работы заключается в поиске параметров процесса, при которых энергетические затраты на его проведение минимальны и при этом время проведения процесса сокращалось, так как на практике пользователь таких емкостей рекомендует расход пара и время процесса исходя из опыта эксплуатации. На нефтеперерабатывающих заводах такая практика приводит к необоснованно завышенным расходом пара.

На рис. 1а представлены расчеты динамики энергетических затрат при четырех различных постоянных расходах греющего пара. На рис.1б представлена зависимость общих энергетических затрат на проведение процесса от расхода греющего пара, которые находятся как ординаты линий рис.1а, соответствующих времени окончания процесса. При

построении этого графика проводились расчеты для 30 различных постоянных расходов греющего пара. Точки, соответствующие расходам пара, для которых построены зависимости на рис.1а, обозначены теми же цифрами.

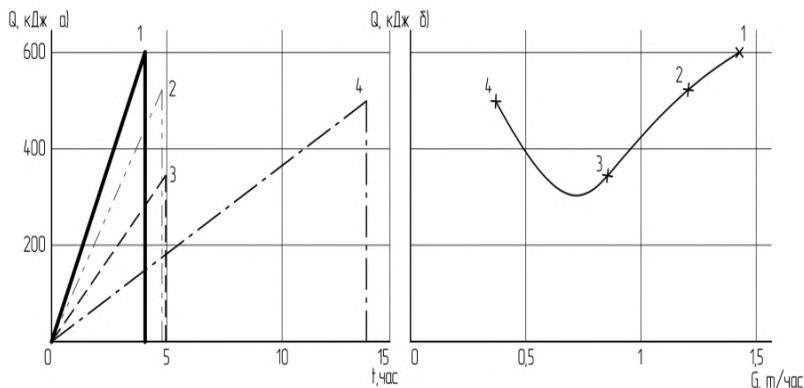


Рис. 1. Зависимость энергетических затрат от расхода греющего пара:
 а) динамика энергопотребления при различных расходах теплоносителя G т/час:
 1 – 1,44; 2 – 1,08 т/час; 3 – 0,72 т/ч; 4 – 0,36 т/ч; б) зависимость общих затрат
 энергии на пропарку от расхода теплоносителя

Результаты показали, что действительно существует оптимальная величина расхода греющего пара, соответствующая минимальным энергетическим затратам на проведение процесса пропарки с заявленной степенью очистки. В рассматриваемом примере она составляет 0,68 т/час. При этом за процессом можно наблюдать в разный промежуток времени и получать промежуточные результаты.

Предлагаемая математическая модель и ее реализация в программном комплексе ANSYS дает возможность моделировать тепло-массообменные процессы, происходящие при пропарке емкостей различной геометрии и ориентации в пространстве, содержащих остатки тяжелых нефтепродуктов. Она может быть рекомендована для выбора рациональных режимов подачи пара и его параметров, соответствующих минимальным энергетическим затратам на проведение процесса для заданной степени зачистки емкости.

Литература

1. **ГОСТ 1510-84.** Нефть и нефтепродукты. Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение [12.03.15].
2. **Щербаков А.З.,** Овчинников В.А., Селиванов Н.В. Определение расхода пара на подогрев нефтепродуктов в резервуарах.//НТИС. Сер. Нефтехимия и нефтепереработка. М.: ВНИИОЭНГ. - 1990. - № 4. - С. 13-15

3. **Елин Н.Н.**, Мизонов В.Е., Макарычев А.Ф., Жуков Б.В. Моделирование процесса пропарки емкостей для хранения тяжелых нефтепродуктов // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2016. № 1. с.52-57.
4. **Елин Н.Н.**, Макарычев А.Ф., Жуков Б.В. Моделирование процесса термической очистки емкостей от остатков вязкопластичных жидкостей// Известия ВУЗов «Технология текстильной промышленности». – 2016. - №4. – с. 136-139.
5. **Бруяка В.Н.**, Фокин В.Г., Солдусова Е.А., Глазунова Н.А., Адеянов И.Е Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учебное пособие, часть 1 //Самарский государственный технический университет. 2010. – 269с.
6. **Тетельмин В.В.**, Язев В.А. Реология нефти. – М.: Граница, 2009. – 256 с.

СЕКЦИЯ 17. «ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА»

УДК 532.542

Е.Г. АДЮНИН¹, д.т.н., профессор,
В.В. СЕННИКОВ, к.т.н., доцент,
И.В. НЕВЕРОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: avdunin@pte.ispu.ru

Устойчивость системы теплоснабжения как критерий обеспечения качества теплоснабжения

Аннотация: в работе проведен анализ возможных вариантов разбалансировки тепловых сетей и методы ее устранения. Приводится математическая модель, позволяющая определять гидравлическую устойчивость системы.

Ключевые слова: система теплоснабжения, регулирование системы, экономия теплоты, котел, сетевой насос

E.G. AVDJUNIN, Doctor of engineering, Professor,
V.V.SENNIKOV, Ph.D. assistant professor,
I.V. NEVEROV, Ph.D. assistant professor
Ivanovo State power engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaja St, 34
E-mail: avdunin@pte.ispu.ru

Resistance heating system as a criterion for ensuring the quality of heat supply

Abstract: work analysis of possible options of imbalance, heat networks and methods for its elimination. Provides a mathematical model which allows to determine the hydraulic system stability.

Key words: heating system, system management, saving heat, the boiler, the pump network

Функции подачи тепла потребителям тепловыми сетями, подключёнными к источникам тепла, могут быть выполнены лишь при получении потребителями горячей воды при заданном гидравлическом перепаде напоров и температуре в подающей линии в соответствии с температурным графиком [1,2].

Был реализован переход с качественного на количественно-качественное регулирование. Для решения задач количественного

регулирования местных систем была переложена система автоматического регулирования, которая позволит:

- минимизировать «перетопы» в период температур наружного воздуха выше точки излома температурного графика;
- получить инструмент для экономии тепла за счёт оптимизации системы потребления;
- улучшить гидравлические характеристики тепловых сетей;
- решить проблемы с пьезометрическими характеристиками сети за счёт установки регуляторов прямого действия и насосов смешения;
- Обеспечить значительную экономию топлива.

При значительном количестве подключённых потребителей к тепловой сети большое значение имеет строгое соблюдение установки дроссельных устройств. Изменение количества теплоты, транспортируемого по тепловым сетям, можно характеризовать коэффициентом гидравлической устойчивости [2].

Исследование функциональности и преимуществ применения в тепловых сетях устройства по устранению «перетопа» с ЧРП и регулируемым клапаном.

На рис. 1 представлена схема устройства по устранению перетопа в тепловой сети при повышенной температуре окружающего воздуха.

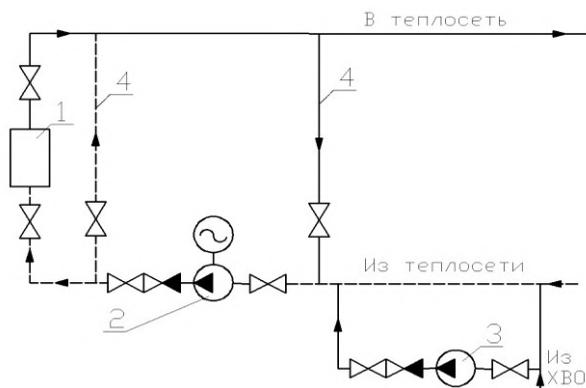


Рис. 1. Схема устройства по устранению «перетопа»

Для технико-экономической оценки рыночного потенциала разработанных научно-технических основ и способов регулирования отпуска тепловой энергии с применением термогидравлического распределителя, насосного узла смешения с ЧРП и устройства по устранению «перетопа» в осенне-зимний период в двухтрубных тепловых сетях с нагрузкой горячего водоснабжения используем метод цепного показателя с использованием понижающих и повышающих коэффициентов.

Устройство по устранению «перетопа» рекомендуется к применению в двухтрубных тепловых сетях с нагрузками отопления и горячего водоснабжения. Устройство позволяет сохранить качественный метод регулирования отопительной нагрузки и сохранить постоянный расход на отопление.

Устройство по устранению «перетопа» с ЧРП и регулируемым клапаном требует подбора насоса и регулируемого клапана с характеристиками, обеспечивающими подключение потребителей, с заданными тепловыми нагрузками.

В работе проведен анализ возможных вариантов разбалансировки тепловых сетей и методы ее устранения. Приводится математическая модель, позволяющая определять гидравлическую устойчивость системы.

Литература

1. Авдюнин Е.Г. Системы теплоснабжения промышленных предприятий: учебн. пособие, ч.1 ./ Е.Г. Авдюнин, Ю.Г. Ершов, Н.К. Шарафутдинова. – Иваново: ИГЭУ, 2004 – 108 с.
2. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. – М., Изд. МЭИ. 2001. 472 с.

УДК 532.542

С.В. АНДРЕЕВ, И.М. ОКАТОВ, М.С. ЩЕРБАКОВ, студенты,
Е.Г. АВДЮНИН, д.т.н., профессор,
В.В. СЕННИКОВ, к.т.н., доцент
Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: avdunin@pte.ispu.ru

Модель гидравлического распределителя

Аннотация: разработана модель гидравлического распределителя. Приведённые математические выкладки позволяют подобрать диаметр и длину перемычки. Величина отклонения стабилизируемого расхода воды через котёл определяется диаметром перемычки и режимом работы системы теплоснабжения.

Ключевые слова: система теплоснабжения, термогидравлический распределитель, диаметр и длину перемычки, котел, сетевой насос

S.V.ANDREEV, I.M.OKATOV, M.S.SHCHERBAKOV, students,
E.G. AVDJUNIN, Doctor of engineering, Professor,
V.V.SENNIKOV, Ph.D. assistant professor,
Ivanovo State power engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaja St, 34
E-mail: avdunin@pte.ispu.ru

Hydraulic spreader model

Abstract: a model for hydraulic spreader. Published mathematical calculations allow you to choose the diameter and length. Deflection stabilized water flow through

the boiler is determined by the diameter of the jumpers and the operation mode of the heat supply system

Key words: heating system, termogidravlicheskiy, diameter and length jumpers, the boiler, the pump network

Термогидравлический распределитель (ТГР) – устройство, предназначенное для улучшения процесса регулирования отпуска тепловой энергии. Применение ТГР обеспечивает за счет независимости контуров источника и потребителей оптимальный отпуск тепловой энергии различным потребителям с различными параметрами с минимальными энергозатратами, поэтому вопросы моделирования данных устройств имеют актуальное значение.

Существуют различные типы ТГР – вертикальные с подключением до 3-х потребителей, коллекторные (вертикальные и горизонтальные) с возможностью неограниченного подключения потребителей, коллекторные, соединенные короткой U-образной трубой и др.

Тепловые схемы котельных имеют вторичный контур, включающий в себя несколько отопительных контуров. При различных режимах работы котельной расходы в первичном и вторичном контурах не совпадают, что обуславливает необходимость гидравлической развязки контуров.

Эффективная работа требует поддержания постоянным расхода сетевой воды через котлоагрегаты, а также разработку сбалансированных тепловых и гидравлических режимов нескольких самостоятельных контуров, подключённых к источнику.

Одним из способов решения этой задачи является применение гидравлического распределителя (рис. 1)

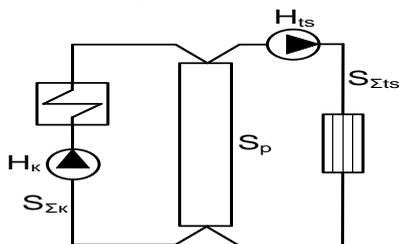


Рис. 1. Схема работы системы теплоснабжения

Схема рис. 1 состоит из двух контуров и двух узлов. Ее математическая модель на основании 1 и 2 законов Кирхгофа содержит два уравнения потерь напора и одно уравнение баланса расходов. [1]

$$\left. \begin{aligned} s_{\Sigma k} \cdot Q_k \cdot |Q_k| + s_p \cdot Q_p \cdot |Q_p| - H_{k0} &= 0 \\ s_{\Sigma ts} \cdot Q_{ts} \cdot |Q_{ts}| - s_p \cdot Q_p \cdot |Q_p| - H_{ts0} &= 0 \\ Q_k - Q_{ts} - Q_p &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где: H_{k0} - напор насоса котельной при нулевой подаче, м.в.ст.; $s_{\Sigma k}$ - сопротивление проточной части котлового контура, м·час²/м⁶; Q_k - подача насоса, м³/час.; H_{ts0} - напор сетевого насоса при нулевой подаче, м.в.ст.; $s_{\Sigma ts}$ - сопротивление проточной части тепловой сети, м·час²/м⁶;

Q_{ts} - подача сетевого насоса, м³/час.; S_{tk} - сопротивление трубопроводов обвязки котла, м·час²/м⁶; S_{ts} - сопротивление проточной части насоса, м·час²/м⁶; s_{ts} - суммарное сопротивление трубопроводов тепловой сети и потребителей.

При рабочем режиме распределителя направления расходов в ветвях котла и потребителя совпадают с направлением действия насосов. Расход по перемычке направлен со стороны напора в сторону всасывания насоса котла.

Анализ расчётных данных показывает, что в реальных условиях работы гидравлического распределителя, режим движения жидкости в перемычке соответствует числу Рейнольдса значительно превышающее 2320. По данным [2] в этом случае хорошие результаты даёт универсальная формула А.Д. Альтшуля по определению коэффициента гидравлического трения. Потери напора на участке трубопровода складываются из местных и потерь по длине, определяются по формуле Дарси–Вейсбаха. [2]

Установка ТГР в тепловом пункте здания обеспечивает независимость контуров отопления и распределительной сети: режим системы отопления любого потребителя не оказывает влияния на гидравлический режим распределительной сети. Циркуляция воды в системе отопления осуществляется за счёт работы собственного низконапорного насоса малой мощности. Сетевой циркуляционный насос не будет создавать циркуляцию в отопительной системе здания, так как ТГР является участком с малым гидравлическим сопротивлением. Насос системы отопления отбирает воду в нужном количестве из распределительного контура, обеспечивая её циркуляцию.

Расчёты показывают, что даже при больших диаметрах трубопроводов, число Рейнольдса существенно больше критического.

Приведённые математические выкладки позволяют подобрать диаметр и длину перемычки для заданных конкретных условий. Величина

отклонения стабилизируемого расхода воды через котёл определяет диаметр перемычки и режимом работы системы теплоснабжения.

Литература

1. Зингер Н.М. Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем. М., «Энергия», 1976. 336 с. с ил.
2. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети. М., Изд. МЭИ. 2001. 472 с.

УДК 621.9.

А.А. АРБАТСКИЙ¹ к.т.н., ст. преподаватель
В.С. ГЛАЗОВ² к.т.н., доцент

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250 г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14
E-mail: arbatsky1985@mail.ru¹, mamurik@bk.ru²

Влияние периодического обмерзания тепловых утилизаторов на эффективность работы

Аннотация: произведена оценка влияния периодического обмерзания тепловых утилизаторов с промежуточным теплоносителем на их совокупную энергетическую эффективность в системе вентиляции. Предложен способ борьбы с обмерзанием и разработана экспериментальная методика для построения математической модели роста ледяной «шубы» на теплообменниках.

Ключевые слова: тепловые утилизаторы, вентиляция и кондиционирование, обмерзание, конденсация, эффективность тепловой утилизации

А.А. ARBATSKIY PhD¹, V.S. GLAZOV, PhD²

National Research University «MPEI»,
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya st. 14

The effect of periodic freezing of the heat recovery systems

Abstract: was made approximate analysis of periodic freezing for heat recovery systems with intermediate thermal agent in hvac systems. Designed the method of struggle with freezing and elaborated of experimental method, which will allow make of numerical model of ice growth on surface of heat exchanger.

Key words: heat recovery, ventilation and air conditioning, freezing, condensation, effect of heat recovery

Актуальность. На данный момент в системах вентиляции и кондиционирования зданий широко применяются различные системы тепловой утилизации, основанные на передаче тепла от вытяжного воздуха к приточному. Когда, из-за конструктивных особенностей здания и характера утизируемых выбросов, невозможно применить ни роторные регенераторы, ни пластинчатые рекуператоры, применяются тепловые утилизаторы с промежуточным теплоносителем (рис. 1). Данный тип

тепловых утилизаторов характеризует наиболее низкая тепловая эффективность среди прочих методов экономии энергоресурсов в системах вентиляции. Связано это со следующими факторами:

1) Существенны потери при передаче тепла промежуточным теплоносителем (ПТ);

2) Оптимизация температурного графика ПТ выполняется путем выравнивания параметров рядности теплообменников на притоке и на вытяжке. Это, в большинстве случаев, приводит к отрицательным температурам ПТ и, как следствие, к периодическому обмерзанию теплообменника, находящегося на вытяжке. Особенно при высокой влажности вытяжного воздуха;

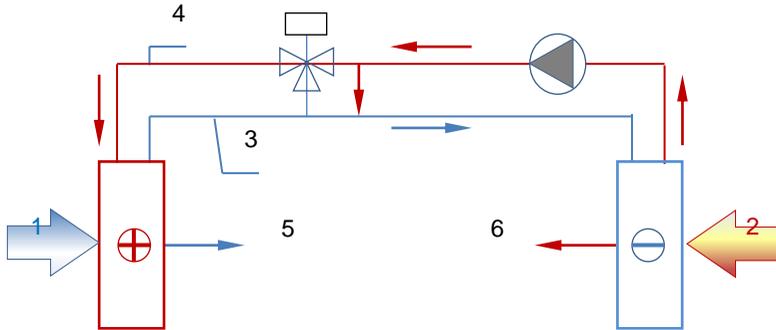


Рис. 1. Принципиальная схема системы тепловой утилизации с промежуточным теплоносителем:

- 1 – воздух с улицы, 2 – вытяжной воздух, 3 – «холодный» теплоноситель,
4 – «горячий» теплоноситель, 5 – нагретый воздух,
6 – охлажденный вытяжной воздух

3) Эффективность всей системы зависит от эффективности калорифера как на приточной, так и на вытяжной системах. При этом выпадение конденсата на теплообменнике вытяжной системы способствует, с одной стороны, повышению эффективности, с другой при обмерзании, средняя по периоду эффективность существенно снижается, в то время как эффективность теплообменника на притоке, остается неизменной. Однако тепловой поток, передаваемый воздуху, теплообменником, на приточной части, существенно изменяется, за счет изменения температурного напора, при изменении температурного графика теплоносителя. На рис. 2 приведен примерный график изменения совокупной эффективности системы в течении времени (исходя из укрупненной оценки по уравнению (2)). Фактически данный график отображает эффективность системы от начала работы, до обмерзания (≈ 950 с).

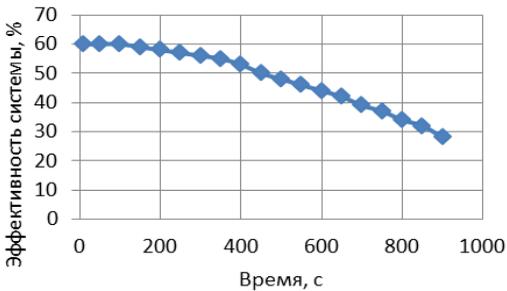


Рис. 2. График изменения эффективности системы рекуперации в течении времени работы

Таким образом, **основная цель исследования** заключается в разработке эффективной системы борьбы с обмерзанием, для теплообменников влажного воздуха, и повышения эффективности систем тепловой утилизации.

В первую очередь данную систему необходимо разработать

для систем тепловой утилизации с промежуточным теплоносителем, т.к. она, на данный момент, является наиболее низкоэффективной.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- Изучить механизм возникновения ледяной шубы на поверхностях теплообмена при взаимодействии с влажным воздухом;
- Определить инженерные методы борьбы с обмерзанием, для каждого типа теплообменного аппарата и проверить эффективность их работы;
- Разработать математическую модель роста ледяной шубы на поверхностях теплообмена, которая позволит варьировать ключевые параметры (геометрические и алгоритмические), определенных ранее, инженерных средств борьбы с обмерзанием;

Следует отметить, что попытка решения указанной выше проблемы представлена в работах [1] и [2]. Однако в работе [1] рассмотрены модели обледенения в области околосвуковых скоростей, и при поступлении жидкости на холодную поверхность из окружающей среды, в то время, как в нашем случае, конденсат будет образовываться непосредственно на теплообменной поверхности. Что касается работы [2], в ней не рассматриваются механизмы обледенения, а приведено только эмпирическое исследование с общими инженерными рекомендациями. В тепловых утилизаторах рассматриваемых систем, проблема решается исключительно методами контроля и автоматизации уже по факту образования значительного обледенения, что снижает эффективность данных систем в длительном периоде.

Решение поставленных задач

Для укрупненной, качественной оценки механизма возникновения ледяной «шубы» на поверхности теплообменника, использована классическая модель обтекания труб воздухом [3].

Предполагается, что обледенение в первую очередь происходит на следующих участках:

- с наибольшим расходом выпадающего конденсата;

- с наименьшей температурой теплоносителя;
- с наименьшей скоростью воздуха;

В подавляющем большинстве случаев используется противоточная схема движения теплоносителя, а т.к. за трубками образуются турбулентные вихри, существенно снижающие скорость потока воздуха, то рост ледяной «шубы» происходит на «задней» части трубок калорифера, в участках, обозначенных на рис. 4.

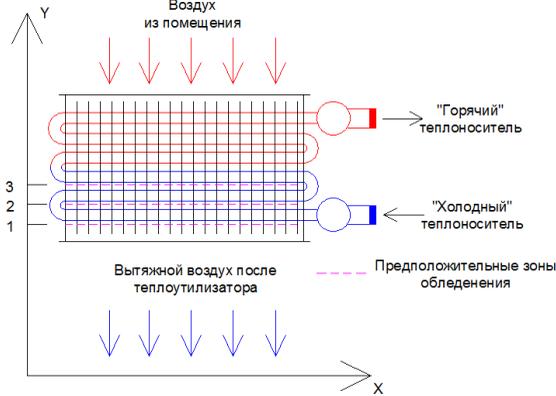


Рис. 3. Предположительные зоны роста обледенения

Данный механизм впоследствии будет проверен экспериментально. Однако на данный момент, подобных качественных предположений достаточно, чтобы на основании базового энергетического уравнения (1) оценить величину потери тепловой мощности из-за периодического обмерзания в расчетном режиме.

При этом следует понимать, что вероятность образования обледенения и скорость его роста не одинакова по всем обозначенным зонам и зависит от изначальной входной температуры холодного теплоносителя. Принимая во внимание оси, обозначенные на рис. 3, качественный график предположительной скорости роста обледенения, по участкам 1, 2 и 3 будет выглядеть так, как показано на рис. 4. Данный график составлен на основании:

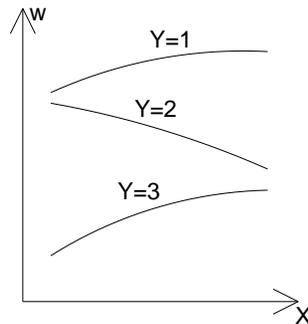


Рис. 5. Качественный график скорости роста ледяной «корки»

- Общего энергетического уравнения (1);
- Экспоненциального закона распределения температуры теплоносителя в теплообменнике;
- Расчета процесса обработки воздуха в h-d диаграмме, который говорит о прогрессирующей скорости уменьшения абсолютного влагосодержания воздуха от последнего ряда, к первому (т.е. большая часть влаги конденсируется ближе к входу воздуха, при том, что к последним рядам теплообменника конденсация не прекращается);
- Данных экспериментального исследования [2], где говорится о том, что выпадение большого количества конденсата способствует уменьшению скорости роста обледенения (тоже следует и из уравнения (1));

$$Q_{скр} + Q_{внутр} + Q_{суб} + Q_{исп} + Q_{\lambda} + Q_{конв} + Q_{рад} = 0 \quad (1)$$

где: $Q_{скр}$ - скрытая теплота затвердевания, $Q_{внутр}$ - внутренняя теплота, $Q_{суб}$ - скрытая теплота сублимации, $Q_{исп}$ - скрытая теплота испарения, Q_{λ} - теплота передаваемая теплопроводностью, $Q_{конв}$ - теплота передаваемая конвекцией, $Q_{рад}$ - теплота передаваемая излучением;

Уравнение (1) практически полностью эквивалентно уравнению теплового баланса (10) приведенному в [1]. Исключены только составляющие связанные с теплотой кинетического нагрева и теплотой аэродинамического нагрева, т.к. в условиях нашей задачи мы имеем дело с малыми скоростями воздуха (до 10 м/с), и данные составляющие будут пренебрежимо малы.

Соответственно подставляя в данное уравнение, величины принятые по укрупненным параметрам, мы можем вычислить величину свободной энергии, которая, при наличии отрицательной температуры поверхности охлаждения, пойдет на образование ледяной «корки», с погрешностью на возможное сдувание образующихся частиц льда.

Критическую толщину ледяной корки можно принять равной половине диаметра трубы, на основании традиционной компоновки подобных теплообменников. Таким образом, имеем:

$$\tau = mc_p t / Q \quad (2)$$

где: m – масса образованного льда; c_p – удельная теплоемкость льда; t – температура льда; Q – количество свободной энергии (1).

Полученный примерный график с обозначением периодов заморозания-оттайки (рис. 2.), позволяет обосновать актуальность нашей работы. Исходя из всех приведенных выше соображений, можно предложить следующую совокупность инженерных методов борьбы с обмерзанием:

- Размещение на поверхности теплообменника датчиков, контроля возникновения ледяной шубы (предположительно датчики температуры) рис. 5;

- По сигналам данных датчиков, установленных в местах роста ледяной шубы, осуществление тонкой регулировки подмешивания холодного теплоносителя на теплообменник вытяжной системы рис. 1;

На сегодняшний день с целью фиксирования образования ледяной шубы на теплообменниках, применяются дифференциальные датчики давления, которые срабатывают, когда уже есть значительные потери давления, за счет образования ледяной «шубы» на 40-50% поверхности теплообмена.

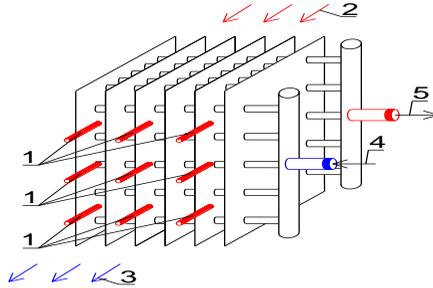


Рис. 5. Система контроля поверхности теплообменника: 1 – датчики контроля поверхности, 2 – вытяжной воздух, 3 – воздух после тепловой утилизации, 4 – «холодный» теплоноситель, 5 – «горячий» теплоноситель

Основное отличие от существующих на сегодняшний день методов борьбы с обмерзанием утилизаторов такого типа, является именно тонкая регулировка, которую можно осуществить зафиксировав обмерзание на самой ранней стадии, при этом не снизив тепловую мощность теплообменника более чем на 5%, фактически сохранив постоянную эффективность системы.

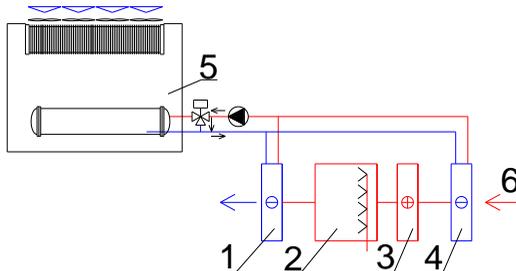


Рис. 6. Экспериментальная установка для исследования процессов обмерзания теплообменников систем вентиляции:
1 – исследуемый теплообменник, 2 - парувлажнитель, 3 – нагреватель, 4 - охладитель, 5 – холодильная машина

Соответственно для получения реальной математической модели роста обледенения теплообменника, и как следствие разработки алгоритма работы системы, необходимо создание экспериментальной установки, принципиальная схема которой представлена на рис. 6.

Данная экспериментальная установка, позволит визуализировать механизм роста обледенения на поверхности теплообмена, при разной температуре теплоносителя. Наблюдение за процессом обледенения при разной температуре и влажности воздуха, позволит создать универсальный алгоритм, либо серию алгоритмов, действующих в определенном диапазоне параметров, для обеспечения работы предложенной системы. Соответственно для каждой конструкции теплообменных аппаратов могут быть решены все три поставленные задачи, и опробован, как предложенный инженерный метод борьбы с обледенением, так и предложены иные методы по результатам проведения испытаний.

Заключение: В рамках данной работы, произведена предварительная оценка механизма возникновения ледяной шубы для систем тепловой утилизации с промежуточным теплоносителем, и предложен инженерный метод борьбы с данным явлением. Разработана принципиальная схема экспериментальной установки, для последовательного и точного решения поставленных задач, для тепловых утилизаторов с промежуточным теплоносителем.

Литература

1. **С.В. Алексеенко, А.А. Приходько** Численное моделирование обледенения цилиндра и профиля, обзор моделей и результаты расчетов – «Ученые записки ЦАГИ» №6, Днепропетровский национальный университет, 2013 г.
2. **Noval**, Условия эффективной работы пластинчатых теплообменников (рекуператоров) в суровых климатических условиях – «Технический бюллетень» №9, 2009 г.
3. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача. - М.: Энергия, 1975 г.

УДК 621.577.42

С.А. БАННИКОВА, ст. преп.
В.М. ЗАХАРОВ, к.т.н. профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: sabannikova@rambler.ru

Экспериментальное исследование устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы

Аннотация. Экспериментально исследованы процессы переноса тепловой энергии в элементах канала теплотрассы и эффективность применения теплоотражающих экранов.

Ключевые слова: тепловая сеть, тепловые потери, теплоотражающий экран.

S.A. BANNIKOVA, senior teacher,
V.M. ZAHAROV, candidate of science, professor,

Ivanovo State Power Engineering University 153003 Ivanovo,
Rabfakovskaya St., 34

Experimental research of device for recycling thermal losses in the thermal network

Abstract: The processes of the thermal energy transfer in the thermal network elements and efficiency of heat reflecting screen application are experimentally investigated.

Key words: thermal network, thermal losses, heat reflecting screen.

В настоящей работе экспериментально исследуется устройство, позволяющее повысить эффективность работы тепловых сетей путем утилизации неизбежных тепловых потерь. В качестве энергосберегающей технологии предложено устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы [1,2,3,4]. Данное устройство позволяет, как локализовать тепловые потери, так и за счет их утилизации эффективно производить тепловую энергию, пригодную для нужд теплоснабжения при низких эксплуатационных затратах.

Целью настоящей работы стало экспериментальное исследование процессов переноса тепловой энергии в канале теплотрассы. Для достижения поставленной цели была разработана и создана экспериментальная установка, принципиальная схема базовой конструкции которой представлена на рисунке 1.

Базовая конструкция экспериментальной установки включает в себя цилиндрическую гладкостенную трубу, выполненную из полимера, канала в форме параллелепипеда прямоугольного сечения, выполненного из оргстекла и вентилятора с теплоэлектронагревателем (ТЭНом), выполняющим роль источника тепловой энергии.

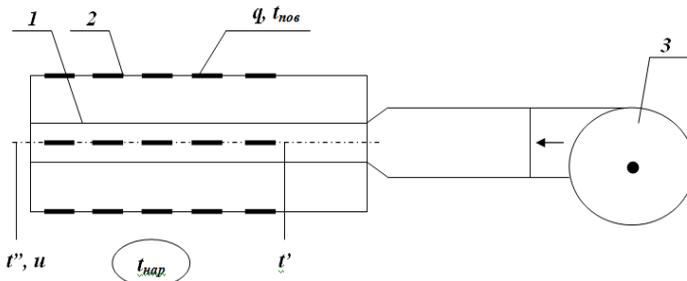


Рис.1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1 – трубопровод; 2 – стенки канала; 3 – вентилятор с теплоэлектронагревателем

Основным условием работы устройства является отбор теплоты, необходимый для эффективной работы теплового насоса с одной стороны и не превышающий допустимые значения, регламентируемые [5].

Для обеспечения режима работы устройства, при котором отбор теплоты не влияет на тепловой режим тепловой сети, в работе было принято решение установить теплоотражающий экран, отсекающий часть теплового потока от сети. Теряющаяся при этом с поверхности экрана в окружающую среду тепловая энергия может полностью быть использована для дальнейшей генерации в трансформаторе теплоты.

Для опытов, связанных с исследованием влияния на процесс теплообмена теплоотражающих экранов, базовая конструкция экспериментальной установки оснащается дополнительно теплоотражающими экранами. Теплоотражающий экран выполнен из алюминиевой фольги.

Таким образом, экспериментальное исследование проведено последовательно для трех вариантов конструкции экспериментальной установки:

1. Базовой конструкции;
2. Базовой конструкции, оснащенной одним теплоотражающим экраном, расположенным вокруг трубопровода;
3. Базовой конструкции, оснащенной двумя теплоотражающими экранами, один из которых расположен вокруг трубопровода, а другой – у внутренней поверхности стенок канала.

В ходе эксперимента были определен тепловой поток на наружной поверхности канала. Основным измерительным прибором в работе являлся электронный измеритель плотности тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток». Полученные в ходе эксперимента значения, представлены в табл. 1.

В табл. 2 показаны средние по каналу значения плотности теплового потока.

Таблица 1. Экспериментальные данные

Измеряемая величина	Расположение измерительного прибора								
	Верхняя сторона канала			Боковая сторона канала			Нижняя сторона канала		
	Без экрана	С экраном	С двумя экранами	Без экрана	С экраном	С двумя экранами	Без экрана	С экраном	С двумя экранами
Тепловой поток, Вт/м ²	189,0	92,42	62,6	97,5	45,22	29,9	60,1	14,0	12,6

Таблица 2. Средние значения теплового потока

Измеряемая величина	Конструкция экспериментальной установки		
	Без экрана	С экраном	С двумя экранами
Среднее значение теплового потока, Вт/м ²	111	49,2	33,8

Проведенное исследование показало, что применение теплоотражающих экранов в составе конструкции тепловой трассы позволяет решить ряд задач:

- сократить тепловые потери от сети в окружающую среду;
- определить оптимальное место размещения коллектора, входящего в состав устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы;
- производить отбор тепловой энергии для работы устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, не оказывая влияния на тепловой режим сети.

Литература

1. **Банников А.В., Банникова С.А.** Устройство для утилизации тепловых потерь теплотрасс. Патент на полезную модель № 88361
2. **Захаров В.М., Банникова С.А.** Устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Патент на полезную модель № 94988
3. **Захаров В.М., Смирнов Н.Н., Банникова С.А.** Устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Патент на полезную модель № 103175
4. **Захаров В.М., Банников А.В., Банникова С.А., Лапатеев Д.А.** Устройство для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Патент на полезную модель № 116607
5. **СП 61.13330.2012** Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов / Госстрой России. – М.: Минрегион России, 2003. – 22 с.

УДК 697.317.4

Е.А. БУЗОВЕРОВ¹, научный сотрудник,
О.Н. МАХОВ², к.т.н., доцент
М.В. ИСАЕВ³, к.т.н., руководитель проектов, И.Д. ЧЕРНОВ³, директор

¹Объединенный институт высоких температур Российской академии наук,
127412, г. Москва, ул. Ижорская, 13/19
e-mail: teoconsult@inbox.ru

²Ивановский государственный энергетический университет, г. Иваново
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
e-mail: kaf.tovarov.ruc@mail.ru

³ООО «Эксперт Энерго», 109147, г. Москва, ул. Воронцовская, 35
e-mail: isaevm7@mail.ru, igor.chernov@eenergo.ru

О выборе оптимальной мощности котельных при модернизации централизованных систем теплоснабжения

Аннотация. Разработана технико-экономическая модель, позволяющая выполнять экспресс-оценки оптимальной мощности и количества теплоисточников в системе теплоснабжения. Зависимости строятся путем экстраполяции показателей существующей системы теплоснабжения

Ключевые слова. централизованная система теплоснабжения, эффективность, котельных, тепловая сеть

Е.А. BUZOVEROV¹, researcher,
²O.N. MAKHOV, candidate of technical Sciences, docent
M.V. ISAEV³, candidate of technical Sciences, docent, I.D. CHERNOV³, director

¹Joint institute of High Temperatures of Russian Academy of Science,
127412, Moscow, Izhorskay St, 13/19
e-mail: teoconsult@inbox.ru

² Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
e-mail: kaf.tovarov.ruc@mail.ru

³Expert Energo Ltd, 109147, Moscow, Voronovskay St., 35
e-mail: isaevm7@mail.ru, igor.chernov@eenergo.ru

About method of calculations optimum boiler plant capacity for the modernization project of the district heating systems

Abstract. Techno-economic method for express evaluation optimum capacity and quantity of the boiler plant in the district heating system has developed. Existing parameters of district heating system have used for calculating projecting parameters as function of capacity.

Key words: district heating system, efficiency, heat source, heat pipe.

Российские системы теплоснабжения имеют высокий износ, и необходимость их реконструкции является объективной неизбежностью. Одной из проблем, препятствующих реализации программ реконструк-

ции, является низкий уровень предпроектной проработки, связанной с недостатком финансирования и времени на стадии подготовки соответствующих программ. Существующие методики являются трудоемкими, требуют привлечения специализированных организаций, что связано с достаточно существенными затратами. В связи с этим представляется актуальной задача создания простых и доступных методик, позволяющих оптимизировать технико-экономические показатели системы теплоснабжения в процессе реконструкции. В данном случае рассмотрен вопрос оптимизации мощности теплоисточников.

Для разработки методики оптимизации мощности котельных в централизованной системе теплоснабжения использованы методы статистической обработки данных о капитальных и эксплуатационных затратах для определения корреляционных зависимостей технико-экономических показателей системы теплоснабжения от мощности теплоисточников. Также были использованы данные [1, 2, 3, 4, 5]. Зависимости построены путем экстраполяции показателей существующей системы теплоснабжения на проектные варианты. В результате разработана технико-экономическая модель, позволяющая выполнять экспресс-оценки оптимальной мощности и количества теплоисточников в системе теплоснабжения.

Целевыми критериями, которые необходимо оптимизировать при определении мощности теплоисточника являются плановые затраты на строительство $KЗ$, тыс. руб., издержки на эксплуатацию системы теплоснабжения $\mathcal{E}З$, тыс. руб./год, а также приведенные затраты $\mathcal{Z}_{прив}$, тыс. руб./год.

$$\mathcal{Z}_{прив} = CRF \cdot KЗ + \mathcal{E}З;$$

где CRF - (capital return factor) – безразмерный коэффициент возмещения капитала.

Оптимизация ведется по ключевому параметру - единичной тепловой мощности котельных. Предполагается, что общая мощность рассматриваемого района теплоснабжения делится между несколькими теплоисточниками в равной пропорции. Для принятой плотности тепловых нагрузок, технологической схемы и прочих инженерных решений, удельные капитальные вложения в реконструкцию источника и сетей, а также эксплуатационные затраты могут быть выражены функцией тепловой мощности.

Важными показателями, от которых во многом зависит экономичность системы централизованного теплоснабжения, являются материальная характеристика и длина тепловых сетей. Данные параметры позволяют с достаточной точностью определить необходимые технико-экономические показатели, относящиеся к строительству и эксплуатации тепловых сетей, в том числе теплопотери, расход электроэнергии на транспорт тепловой энергии и другие переменные издержки. Затраты, связанные со строительством и эксплуатацией ко-

тельных, могут быть оценены исходя из их мощности.

В расчете используются технико-экономические показатели существующей системы теплоснабжения, которым соответствует фактическое значение мощности теплоисточника. Это позволяет построить кривую зависимости приведенных затрат системы теплоснабжения от ее мощности. Аналогично рассчитывается зависимость капитальных и эксплуатационных затрат от мощности (рис. 1).

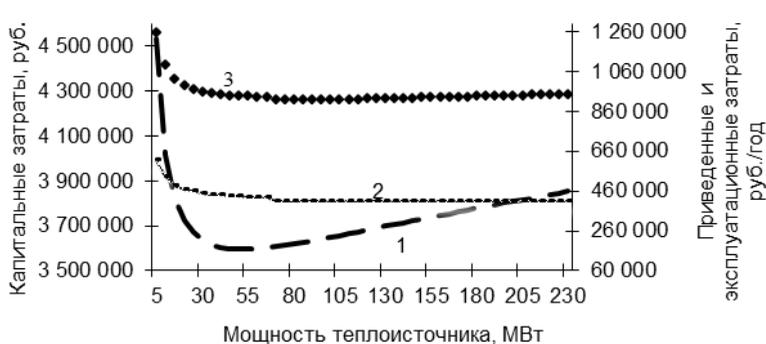


Рис. 1. Пример построения кривых зависимости приведенных, капитальных и эксплуатационных затрат от мощности котельной:
 1 – капитальные затраты, 2 – эксплуатационные затраты;
 3 – приведенные затраты

Полученные зависимости позволяют найти такие значения мощности котельных, при которых могут быть оптимальны приведенные, либо эксплуатационные или капитальные затраты. Может также решаться задача поиска совместного оптимума.

Литература

1. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов. - М.: МЭИ, 2001. –472 с.
2. **Ионин А.А.** Теплоснабжение. Учебник для вузов / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков. – М.: Стройиздат, 1982. –336 с.
3. **Либерман Н.Б.** Справочник по проектированию котельных установок систем централизованного теплоснабжения / Либерман Н.Б., Нянкoвская М.Т. -М.: Энергия, 1979. –224 с.
4. Справочник проектировщика. Проектирование тепловых сетей / Александров И.П., Беляйкина И.В., Далин А.М. и др. – М.: Издательство литературы по строительству, 1965. –360 с.
5. **Бузоверов Е.А.** Об удельных капитальных затратах на строительство котельных и тепловых сетей / Бузоверов Е.А., Островский В.М. // Промышленная энергетика. –2015. № 11. -С.7-11.

УДК 620.9: 658.264

М.А. ГОРОЖАНИН, директор; А.В.КОНОВАЛОВ, к.т.н., доцент,
В.В.СЕННИКОВ, к.т.н., директор УНЦ ПТ,
М.С.ЩЕРБАКОВ, магистр гр. 1-4М

ГКУ Центр тарифно-экспертного обеспечения МО,
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
E-mail: kbispu@mail.ru

Проблемы теплоснабжения на современном этапе

Аннотация: предлагаются пути решения ряда проблем в теплоснабжении населенных пунктов.

Ключевые слова: схемы теплоснабжения, электронная модель, информационная система мониторинга.

M.A.GOROZHANIN, Director; A.V.KONOVALOV, Ph.D.,assistant professor,
V.V SENNIKOV., Ph.D., Director,
M.S. SHCHERBAKOV, graduate student 1-4M

Center of Tariff and Expert Support Moscow Region,
Ivanovo State Power Engineering University
153000 Ivanovo Rabfakovskaya St, 34
E-mail: kbispu @ mail.ru

Problems of heat supply at the present stage

Abstract. The ways of solving a series of problems in the heat supply of settlements are proposed.

Key words: heat supply schemes, electronic model, information monitoring system.

За последнее время в коммунальной сфере наметилась тенденция к росту задолженности за потребленный газ у теплоснабжающих организаций городских и сельских поселений, а также городских округов Московской области.

Следует отметить, что ситуация с задолженностью юридических организаций и предприятий ЖКХ перед газовщиками сложилась по ряду причин:

1. Невершенство тарифного регулирования в сфере теплоснабжения, в результате чего размеры тарифов предприятий ЖКХ не покрывают реальных затрат на выработку тепла.

Ситуация усугубляется в связи с тем, что в настоящее время для уменьшения расходов на управленческие нужды наблюдается тенденция, особенно в Московском регионе, по объединению городских и сельских поселений в городские округа с определением и установлением в них единой теплоснабжающей организации (ЕТО) с единым для всех организаций тарифом на потребляемые энергоресурсы.

2. Неудовлетворительное состояние основного и вспомогательного, а также газоиспользующего оборудования котельных.

На котельных с переходом на пониженные параметры работы оборудования не подверженного контролю Ростехнадзора РФ резко возрастают гидравлические потери, особенно местные, в трубопроводах котельной. Водяной тракт котельной должен быть обязательно реконструирован, без реконструкции располагаемый напор котельной уменьшается на 20-30 м. вод. ст. Также должны быть выполнены новые конструктивный и наладочный гидравлические расчёты тепловой сети на пониженный температурный график.

Тепловая энергия, поставляемая источником тепловой энергии в тепловую сеть должна обладать *качеством и количеством*. Обычно понятие «качества» отождествляется с *температурой теплоносителя* подающего трубопровода теплосети. Мы предлагаем распространить это понятие и на величину *располагаемого напора* у источника и у потребителя тепловой энергии. Значение располагаемого напора у потребителя определяется схемой присоединения системы отопления к тепловым сетям. Значение располагаемого напора источника должно обеспечить величину требуемого напора у каждого потребителя.

Таким образом, источник должен обеспечить потребителей тепловой энергией требуемого «качества» и необходимого «количества», т.е. расход сетевой воды определенных параметров.

3. Неудовлетворительное состояние тепловых сетей.

Как известно, нормативный срок службы трубопроводов тепловых сетей в нормальных условиях эксплуатации составляет 25 лет, за пределами этого срока эксплуатации трубопроводов интенсивность их отказов резко возрастает. Кроме того, для трубопроводов с длительным сроком эксплуатации тепловые потери через изоляцию трубопроводов могут достигать значительных величин. Нормативные тепловые потери для трубопроводов одного и того же наружного диаметра, типа прокладки и др. Идентичных условий эксплуатации, введенных в эксплуатацию после 2004 г. меньше в 4 раза, чем для трубопроводов, введенных в эксплуатацию в период с 1959 по 1989 г. включительно. В тепловых сетях городских поселений, особенно в сельских поселениях Московской области срок эксплуатации трубопроводов тепловых сетей значительно превышает нормативные значения. Потери теплоносителя с утечками для трубопроводов со сроком эксплуатации выше нормативного также значительны.

4. Неудовлетворительная эксплуатация тепловых сетей.

В большинстве случаев режим работы тепловых сетей поселений и округов не налажен должным образом:

- расход сетевой воды на 20-30 % превышает расчетные значения;
- если располагаемый напор на источнике недостаточен для обеспечения требуемого значения располагаемого напора у потребителей, что провоцирует переход с зависимой элеваторной схемы присоединения на

непосредственную (путем байпасирования элеватора) с температурой теплоносителя, превышающей допустимые значения, что нарушает нормативный температурно-влажностный режим помещения потребителя, реконструкцию ИТП путем установки повысительных насосов с целью компенсации значительной величины сопротивления системы отопления и пр.

5. Переход от нормативного учета потребления энергоресурсов, в том числе газа, к индивидуальному учету путем установки соответствующих счетчиков и др.

Теплосчетчики на источнике служат для фиксации количества отпущенной тепловой энергии и ее параметров. Счетчики тепловой энергии и теплоносителя у потребителей используются только для установления уровня оплаты за потребленные энергоресурсы. Хотя разработанные методики и программные средства позволяют, используя разработанную электронную модель тепловых сетей поселения и данные узлов учета, создать эффективную систему мониторинга режимов работы системы теплоснабжения (см. этап 3 настоящей статьи).

Коллектив учебно-научного Центра ИГЭУ, совместно с ГКУ «ЦТЭО» МО, в течение многих лет занимается комплексными проблемами энергоснабжения жилых, общественных, административных и промышленных зданий населенных пунктов. За последнее время работа коллектива была акцентирована на разработке (актуализации) схем тепло-, водоснабжения и водоотведения городских и сельских поселений, а также городских округов Московской области.

Работу по разработке (актуализации) схем тепло-, водоснабжения и водоотведения городских и сельских поселений, городских округов условно можно разделить на 4 этапа.

1. В Московском регионе закончена работа по разработке схем теплоснабжения городских и сельских поселений, городских округов в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 154 и продолжается работа по их ежегодной актуализации. К программным средствам, применяемым для разработки электронных моделей поселений предъявляются особые требования, см. ТЗ, полностью выполнить которые, с нашей точки зрения, возможно при использовании программного комплекса (ПК) «ZuluThermo», версия 7.0 и выше. Разработанные в настоящее время и прошедшие экспертизу в МинЖКХ МО схемы теплоснабжения городских и сельских поселений, городских округов состоят из текстового материала: утверждаемой части, обосновывающих материалов, и электронной модели тепловых сетей поселений с обязательным набором слоев, требуемых по ТЗ.

Схемы теплоснабжения ряда поселений, не отвечающие требованиям указанного ТЗ подлежат актуализации (следует подчеркнуть, что ранее утвержденные схемы теплоснабжения были выполнены по ТЗ, не отвечающему современным требованиям).

На данном этапе разрабатывается электронная модель системы теплоснабжения поселений и округов. В результате выполнения наладочного гидравлического расчета тепловых сетей ПК выдает «оптимальный» режим работы тепловых сетей поселений и округов:

– необходимый (достаточный) располагаемый напор на источнике в режиме автоматического подбора;

– величину давления в обратном трубопроводе на источнике в зависимости от геодезической высоты местности и высоты самого высокого здания;

– величину располагаемого напора у потребителей в соответствии с их схемой присоединения к тепловым сетям (зависимая непосредственная, зависимая с элеваторным присоединением, зависимая с насосами смещения, независимая) и величиной сопротивления системы

Электронная модель содержит сведения (базу данных) о паспортизации объектов выработки, транспорта и потребления тепловой энергии, результаты гидравлического расчета тепловых сетей, результаты расчетов потерь тепловой энергии через изоляцию и с утечками теплоносителя, результаты расчетов показателей надежности; пьезометрические графики, разработанные как для текущего, так и для перспективного режима работы тепловых сетей и пр.

Выборочный анализ показывает, что сотрудники теплоснабжающих организаций (основные Заказчики работы) не в полном объеме используют их результаты: электронная модель системы теплоснабжения используется только лишь как база данных по источнику, тепловым сетям и потребителям (диаметры и длины участков тепловых сетей, тип прокладки, год эксплуатации, схема присоединения системы отопления и пр.). Нет анализа режима работы источника: почему завышен располагаемый напор, почему давление в обратном трубопроводе, даже с учетом геодезии местности, имеет также завышенное значение, почему значительна циркуляция сетевой воды, почему сетевые насосы на источнике работают в зоне с низким к.п.д.; перечисленные выше причины провоцируют значительные перерасходы электрической энергии на циркуляцию сетевой воды и пр.

2. В соответствии с Правилами технической эксплуатации тепловых сетей должна, перед началом отопительного сезона, быть проведена наладка гидравлических режимов тепловых сетей. При актуализации схем теплоснабжения поселений и округов Исполнителем должны быть проанализированы результаты проведенной наладки тепловых сетей. При отклонении параметров, полученных в результате выполнения наладочных работ на объектах теплоснабжения, от результатов наладочных расчетов, выполненных с помощью электронной модели, проводится оценка полученных данных с выдачей рекомендаций по корректировке как электронной модели, так и по проведению наладочных работ.

3. Разработка информационной системы мониторинга режимов работы тепловой сети. Программный комплекс системы мониторинга режимов работы тепловых сетей, разработанный совместно с УНЦ распределен-

ных информационных систем и технологий (рук. проф. Косяков С.В.) обеспечивает решение следующих задач:

- Выполнение наладочных и поверочных гидравлических расчетов тепловых сетей, проведение анализа гидравлического и теплового режима работы тепловых сетей с прогнозированием значения температуры внутреннего воздуха у потребителей; оценку тепловых потерь; учет аварийных ситуации;

- Отображение схем тепловых сетей объекта и результатов гидравлических и тепловых расчетов системы теплоснабжения на карте средствами геоинформационной системы (ГИС);

Вышеуказанные разделы выполняются при разработке электронной модели системы теплоснабжения на 1 этапе.

- Автоматизированный сбор данных по учету тепловой энергии и теплоносителя объектов теплоснабжения (почасовые, суточные, месячные и в задаваемый произвольный отрезок времени показания);

- Контроль параметров качества тепловой энергии для источника, тепловой сети и потребителей в порядке значимости параметров качества;

- Сопоставление данных, полученных в результате гидравлического расчета на электронной модели системы теплоснабжения, и фактических данных, полученных с приборов узла учета тепловой энергии и теплоносителя;

- Информирование оперативного персонала об отклонении фактических параметров режимов работы тепловых сетей от нормативных. Выдачу рекомендаций по оптимизации режимов работы системы теплоснабжения с целью проведения мероприятий по энергосбережению;

- Централизованное хранение данных.

Персоналу, эксплуатирующему тепловые сети и теплопотребляющее оборудование в ИТП и ЦТП, затруднительно одновременно контролировать, анализировать и принимать оперативное решение, получая информацию от многочисленных приборов технологического контроля, регулирования и автоматизации. Зачастую из-за отсутствия необходимых приборов возникают сложности с поддержанием оптимального режима работы основного и вспомогательного оборудования на источнике, тепловых сетей и теплопотребляющего оборудования у потребителя. На помощь должна прийти автоматизация и диспетчеризация процесса теплоснабжения в целом, нельзя надеется только на исторически сложившийся опыт эксплуатации конкретной системы теплоснабжения.

4. Обучение персонала. Технический персонал управляющих компаний, как Заказчик, получает качественный продукт – схему теплоснабжения городских и сельских поселений, городских округов в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 154 в которую входит в том числе и электронная модель системы теплоснабжения. Результаты, полученные в ходе разработки (актуализации) схемы теплоснабжения использу-

ется крайне неэффективно в связи с отсутствием знаний и навыков работы с ПК «ZuluThermo».

В ИГЭУ длительное время функционирует «Институт повышения квалификации и переподготовки кадров в энергетике». Разработан проект учебного плана повышения квалификации специалистов, осуществляющих эксплуатацию и разработку теплогидравлических режимов систем теплоснабжения по программе: «Теплогидравлические режимы систем теплоснабжения», а также ряд других учебных планов.

Проблем в теплоэнергетике много, но при грамотном к ним подходе, они решаемы.

УДК 692.83

В.М. ЗАХАРОВ, к.т.н., профессор,
Д.А. ЛАПАТЕЕВ, аспирант,
Н.Н. СМИРНОВ¹, доцент,
Е.В. МАЛЫШЕВ, студент, Р.В. СИРОТИН, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: nsmirnov@pte.ispu.ru¹

Исследование эффективности применения теплоотражающих ставней на окнах в натуральных условиях

Аннотация. Были проведены испытания теплоотражающих экранов, выполненных из алюминиевой фольги и установленных на окнах. Получено значительное увеличение сопротивления теплопередаче оконных конструкций.

Ключевые слова: теплоотражающие ставни, окна, снижение тепловых потерь.

V.M. ZAKHAROV, Candidate of Engineering, professor,
D.A. LAPATEEV, postgraduate student, N.N. SMIRNOV, docent,
E.V. MALYSHEV, student, R.V. SIROTIN, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34
E-mail: nsmirnov@pte.ispu.ru¹

Study of effectiveness of heat-reflecting shutters on windows in full-scale conditions

Abstract. The tests of heat-reflecting shutters made of aluminum screens and installed on windows were carried out. A significant increase in the resistance to heat transfer of window constructions is obtained.

Key words: Heat-reflecting shutters, windows, reduction of heat losses.

Согласно данным Российского информационного агентства и статистического отчёта аналитиков международной компании «BP» о миро-

вом энергопотреблении за 2011 год в структуре потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) в России лидирующие позиции занимает топливно-энергетический комплекс. На его долю приходится 312,4 млн. тонн нефтяного эквивалента (млн. т.н.э.), что составляет 45 % общего потребления ТЭР в России. Значительное потребление ТЭР наблюдается в коммунально-бытовом секторе (159,4 млн. т.н.э. или 23 %), а также в промышленности и строительстве (138,8 млн. т.н.э. или 20 %). На основе полученных данных аналитики Российского информационного агентства сделали выводы, что преобладающая часть потребления ТЭР в быту (более 70 %) приходится на поддержание необходимых параметров микроклимата. «Слабым звеном» в теплозащите зданий являются светопрозрачные конструкции, поэтому разработка новых энергосберегающих окон является актуальной задачей.

Авторами было проведено исследование эффективности применения теплоотражающих ставней, установленных в различных вариациях по отношению к слоям остекления, для снижения тепловых потерь через окна.

Испытания проводились в натуральных условиях в учебной лаборатории ТМО ПП (ауд. А-324). В данном помещении на оконном блоке, представляющем собой двойное остекление из обычного стекла в отдельных деревянных переплётках, устанавливался теплоотражающий ставень. В качестве ставня применялась панель, состоящая из трех слоев алюминиевой фольги. Расстояние между слоями фольги составляло 5 мм. Каркас панели был выполнен из пустотелого дюралюминиевого профиля. Для исключения влияния процессов, проходящих в соседних отсеках окна, в межстекольном пространстве была установлена пенопластовая перегородка для секционирования.

В центральной зоне окна помещался тепломер с чувствительностью $7,1 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{мВ})$ на основе термобатарей PE-128-10-08-S-GL. В качестве вторичного прибора для измерения теплового потока использовался милливольтметр Щ-300. Для определения значений температур применялись термомпары ТХА с диаметром электрода 0,25 мм. Термомпары подключались к измерителю-регулятору температуры ИРТ-4/16. Приборная погрешность составила 7%.

Испытывались следующие варианты:

1. Двойное остекление из обычного стекла в отдельных деревянных переплётках (Контроль 1);
2. Контроль 1 + ставень со стороны теплого помещения;
3. Контроль 1 + ставень со стороны окружающей среды;
4. Одинарное остекление в деревянном переплётке (Контроль 2);
5. Контроль 2 + ставень со стороны теплого помещения;
6. Контроль 2 + ставень со стороны окружающей среды.

В ходе испытаний были получены следующие результаты (см. табл.1, рис.1).

Таблица 1. Результаты теплотехнических испытаний окна со ставнем

№ п/п	Варианты	t_n , °C	t_b , °C	q , Вт/м ²	$R_{пр}$, (м ² ·C)/Вт
1	Контроль 1	2,0	26,7	48,4	0,51
2	Контроль 1 + ставень со стороны теплого помещения	1,2	27,3	17,5	1,49
3	Контроль 1 + ставень со стороны окружающей среды	0,1	27,2	20,8	1,30
4	Контроль 2	1,5	23,0	74,1	0,29
5	Контроль 2 + ставень со стороны теплого помещения	-1,0	28,1	28,3	1,13
6	Контроль 2 + ставень со стороны окружающей среды	-0,2	27,4	30,1	1,02

Пояснение к таблице 1. Символами обозначены следующие величины: t_n – наружная температура воздуха, °C; t_b – внутренняя температура воздуха, °C; q – удельный тепловой поток, Вт/м²; $R_{пр}$ – приведенное сопротивление теплопередаче центральной зоны оконного блока, (м²·C)/Вт.

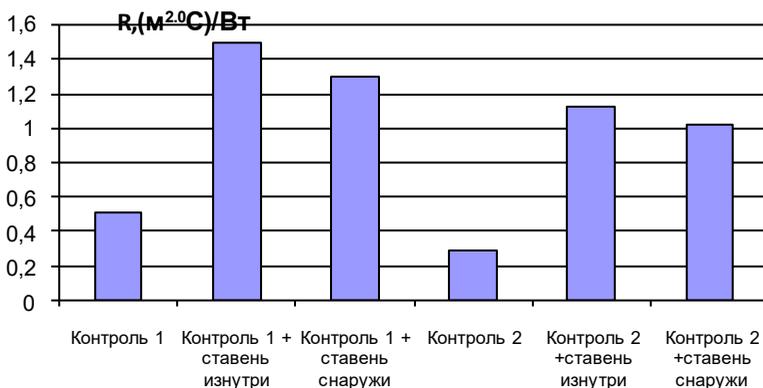


Рис. 1. Приведенное сопротивление теплопередаче центральной зоны окна R для различных вариантов расположения теплоотражающего ставня

Приведенное сопротивление теплопередаче центральной части окна было выше данных, приведенных в литературе [1], в связи с тем, что аудитория А-324 располагается во внутреннем углу здания корпуса «А», поэтому снаружи помещения образуется зона с минимальными скоростями перемещения воздушных масс. Вследствие этого, коэффициент теплоотдачи снаружи окна будет значительно меньше нормативного ($\alpha_{нор} = 23 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$).

Использование теплоотражающих экранов значительно снижают тепловые потери через оконную конструкцию, а также повышают при-

веденное сопротивление теплопередаче окна. При расчете трансмиссионных потерь через окна необходимо также учитывать расположение здания относительно сторон света, а также реальную ветровую нагрузку [2].

Литература

1. **Свод правил** СП 23-101-2004 "Проектирование тепловой защиты зданий». – Москва. – 2004.
2. **Разработка**, программная реализация и проверка адекватности математической модели процесса теплопередачи через окно с теплоотражающими экранами/ В.М. Захаров, Е.Г. Авдюнин, Н.Н. Смирнов и др. // Вестник ИГЭУ. – № 3 – С. 13-27.

УДК 621.577.42

М.В. КОЗЛОВА, студент
А.В. БАННИКОВ, к.т.н. доцент
С.В. ВАСИЛЬЕВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: mariyakozlova1996@gmail.com¹. avbannikov@rambler.ru²

Разработка схемных решений включения тепловых насосов в различные технологические процессы промышленных предприятий

Аннотация. Рассмотрены условия и принципы применения тепловых насосов в технологических процессах промышленных предприятий.

Ключевые слова: тепловой насос, промышленные предприятия, технологический процесс.

М.В. KOZLOVA, student,
А.В. BANNIKOV, candidate of science, senior lecturer,
S.V. VASILIEV, candidate of engineering science, senior lecturer

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: mariyakozlova1996@gmail.com¹. avbannikov@rambler.ru²

Development of the heat pump application to the different technological processes of the industrial plants

Abstract: The conditions and principles of application to heat pumps in the technological processes of industrial plants are considered.

Key words: heat pump, industrial plants, technological process.

Одним из направлений повышения энергетической эффективности технологических процессов промышленных предприятий является использованием тепловых вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) в

качестве источника низкопотенциальной энергии трансформаторов теплоты.

Поскольку при низкой температуре сбросного потока применение рекуператоров и регенераторов для утилизации теплоты является ограниченным, то целесообразным решением может являться использование теплонасосных установок.

Применение тепловых насосов (ТН) позволяет утилизировать потенциал ВЭР с целью дальнейшего вовлечения преобразованной тепловой энергии в технологический процесс.

Возможность утилизации теплоты тесно связана с работой теплопотребляющих технологических устройств. Поэтому включение ТН в технологические процессы промышленных предприятий является целесообразным лишь в ряде случаев, определяемых следующими обстоятельствами:

- совпадением по времени выхода сбросных тепловых потоков и потребления теплоты;
- местом выхода сбросных тепловых потоков и место потребления теплоты;
- фазой носителя сбросной теплоты (твердая, жидкая, газообразная);
- расходом сбросных потоков и потребность в теплоте;
- потенциалом сбросной теплоты.

Например, разделение близкипящих смесей с задачей получения головного продукта высокой чистоты приводит к высокой кратности орошения и большому числу тарелок ректификационных колонн. Для снижения затрат на осуществление данного процесса уместно применить ТН.

Использование в процессах разделения ТН позволяет снизить необратимость, количество тарелок в колонне, потери эксергии, уменьшить суммарную поверхность теплообмена. Так же достигается снижение расходов энергии, за счет того, что при ректификации близкипящих смесей требуются сравнительно небольшие затраты на сжатие (степень сжатия около 2). Минимальная стоимость разделения при использовании в схеме ТН достигается при меньшем флегмовом числе. Таким образом, применение трансформаторов теплоты позволяет уменьшить энергопотребление на 25-30%.

Экономичной схемой может являться схема со сжатием паров вторичного вскипания нижнего продукта. При данной схеме реализация процесса разделения осуществляется следующим образом: часть жидкости из куба колонны используется после дросселирования в качестве хладагента в дефлегматоре, обеспечивая флегмой колонну. Образующиеся в дефлегматоре пары сжимаются в компрессоре и направляются в колонну.

В настоящее время разработаны схемные решения включений ТН в различные технологические процессы: сушки, выпарки, рекомпрессии

пара, ректификации и др [1, 3]. Существующие разработки подобных схем обладают собственными методиками расчета, что позволяет оценить целесообразность их применения в конкретных технико-экономических условиях.

В частности, данным вопросом занимался доцент кафедры промышленной теплоэнергетики Лев Анатольевич Крюков. На основе разработок Л.А. Крюкова авторами ведется работа по созданию альбома схемных решений включения ТН в технологические процессы промышленных предприятий.

В работе в качестве примера приводится схема процесса сушки чайного листа и с использованием трансформатора теплоты (рис. 1)

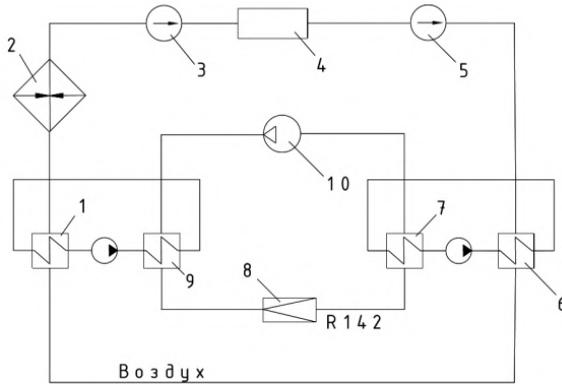


Рис. 1. Принципиальная схема теплонасосной установки для теплоснабжения процесса сушки чайного листа:

- 1 – калорифер; 2 – электрокалорифер; 3 – вентилятор; 4 – чаесушильная печь;
- 5 – вентилятор отработавшего воздуха; 6 – воздухоохладитель;
- 7 – испаритель; 8 – регулирующий клапан; 9 – конденсатор; 10 – компрессор

Таким образом, использование такого технического решения, как включение в технологические схемы промышленных предприятий ТН, может оказаться экономически оправданным, так как за счет использования тепловых ВЭР происходит снижение количества потребляемых энергоресурсов, снижаются суммарные затраты на топливные ресурсы.

Литература

1. **Янтовский Е.И., Левин Л.А.** Промышленные тепловые насосы. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 128 с.: ил. – (Экономия топлива и электроэнергии).
2. **Соколов Е. Я., Бродянский В.М.** Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: Учеб. Пособие для ВУЗов. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с., ил.
3. **Мартыновский В.С.** Циклы, схемы и характеристики термотрансформаторов./ Под ред. В.М. Бродянского. – М.: Энергия, 1979. – 288 с., ил.

УДК 621.313.333

Ф.Г. МАМЕДОВ, студент,
М.Ю. ЮРКИНА, доцент (НИУ «МЭИ»)

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
E-mail: www.famin19@yandex.ru. pre_my@mail.ru

Теплонасосные установки. Применение АБТН в цикле Ренкина

Аннотация: в результате проведенного анализа различных видов ТНУ. Выявлены недостатки и преимущества различных типов ТНУ. Проведен расчет абсорбционной ТНУ использованная, как конденсатор пара из турбины. Для повышения эффективности ТЭС.

Ключевые слова: пароконденсационная установка, абсорбционная установка, коллекторы, ТНУ.

F.G. MAMEDOV, student,
M.Y. YURKINA, assistant professor

Moscow Power Engineering Institute
E-mail: www.famin19@yandex.ru. pre_my@mail.ru

Heat pump system. The usage of the absorpton heat pump in the Rankine cycle

Abstract: In consequence of the conducted analysis of the different types of the heat pump plants we have elucidated the advantages and the disadvantages of all these types. The computation of the absorption is completed. The absorption heat pump plant is used as the vapor condenser from the turbine.

key words: the vapor compression plant, the absorbtion plant, the header, the heat pump plant.

Практическую теплонасосную систему предложил Вильям Томсон в 1852. Она была названа "умножитель тепла" и показывала, как можно холодильную машину эффективно использовать для целей отопления. На данный момент телонасосные установки (ТНУ) обретают все большую популярность в мире. По прогнозам международного энергетического агентства, тепловые насосы будут обеспечивать 10% потребностей в энергии на отопление в странах ОЭСР к 2020 году и 30% к 2050 году. ТНУ пользуются большим спросом. На данный момент в США эксплуатируются 13,5 млн. в Европе 7,5 млн, в Китае около 10 млн. единиц. Однако, наибольшее их количество в Японии, которое составляет 50 млн. единиц. Популярность вызвана эффективностью ТНУ. На 1 кВт потребляемой энергии производится 2-4 кВт тепла. В России ТНУ только начали набирать популярность. Однако уже сейчас ТНУ вызывают много споров. Связано это с тем, что покупка, монтаж и обслуживание теплонасосной установки в дальнейшем является дорогостоящим удовольствием. Для примера возьмем ТНУ типа воздух-воздух

компании «Danfoss» мощностью 11 кВт. Цена данного устройства составляет около 11000 евро. Таким образом, окупаемость в некоторых случаях составляет более 20 лет.

Еще одной проблемой, препятствующей популяризации ТНУ, является отсутствие какой-либо государственной поддержки. Так, в большинстве европейских стран, государство частично или полностью берет на себя затраты на покупку ТНУ. Например, в Финляндии государство предоставляет материальную поддержку гражданам, решившим установить ТНУ в размере 3000 евро. Рассмотрим различные виды пароконпрессорных ТНУ. Их различают, в основном, по виду источника низкопотенциального тепла. ТНУ типа воздух-воздух, воздух-вода. Источником в том и в другом случае является воздух. Принцип работы, как и во всех ТНУ, состоит в использовании испарителя, расположенного на улице во внешнем блоке ТНУ, где происходит отбор низкопотенциального тепла из наружных воздушных масс. Незамерзающая жидкость, циркулирующая в ТНУ. Ее температура всегда ниже температуры окружающей среды. Благодаря низкопотенциальному теплу, отобранному на улице, она нагревается и в теплообменном аппарате подогревает хладагент. Подогретый хладагент направляется в компрессор, где он сжимается до определенного значения давления, вследствие чего температура хладагента увеличивается. Затем нагретый хладагент поступает в конденсатор. Для типа воздух-воздух конденсатор расположен в кондиционере внутри дома, где он с помощью вентиляторов, обдувающих его, охлаждается. Для типа воздух-вода хладагент охлаждается в теплообменном аппарате, где он отдает свое тепло воде, которая необходима для ГВС и отопления. Далее хладагент проходит через дроссельный вентиль, в котором происходит понижение давления и температуры, цикл замыкается.

Данный тип ТНУ имеет ряд преимуществ. Во-первых, отпадает необходимость в земляных работах при его монтаже. Во-вторых, простота, бесшумность и компактность установки. В-третьих, необходимо изначально меньшее капиталовложение, по сравнению с геотермальной ТНУ. Четвертым преимуществом ТНУ типа воздух-воздух, в отличие от ТНУ типа воздух-вода и геотермальной ТНУ, является то, что в летнее время ТНУ этого типа можно переключить в режим охлаждения, тем самым создать в помещениях требуемый микроклимат. Несмотря на свои многочисленные преимущества, данная установка неэффективна. Зависимость тепловой мощности от температуры наружного воздуха делает неэффективным использование ТНУ типа воздух-воздух и воздух-вода для большинства районов РФ. Рассмотрим ТНУ установку воздух-вода компании «Danfoss» модель: DHP-AQ 11, мощность 11 кВт.

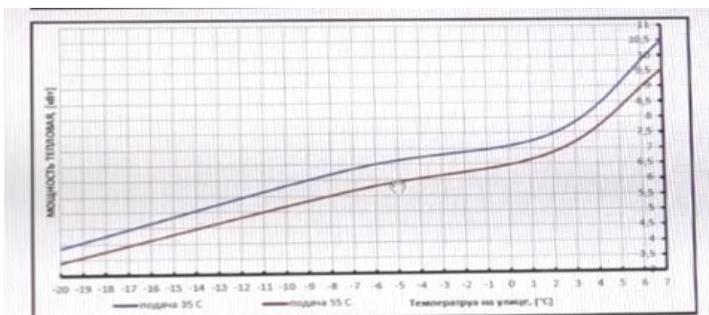


График зависимости тепловой мощности от температуры наружного воздуха

В отопительный период для дома площадью 100 кв.м необходимо 11 кВт тепла. Как видно по графику, тепловая мощность ТНУ в этот период составляет от 4 до 5,5 кВт. Требуемые 11 кВт ТНУ выдает при 7 градусах. Однако при данной температуре нет необходимости в такой тепловой мощности.

Геотермальные тепловые насосы имеют такой же принцип работы, как и у ТНУ воздух-воздух, воздух-вода. Но разница состоит в том, что источником тепла является либо грунт, либо водоем. Коллекторы, необходимые для снятия низкопотенциального тепла, зарывают в землю. Существует два способа размещения коллектора. Первый способ – горизонтальное расположение на глубине 3-4 м. Преимуществом такого расположения является то, что нет необходимости в глубокой скважине. Недостатком является более низкий теплосъем, по сравнению с вертикальным размещением, и более глубокое промерзание грунта. Второй способ – вертикальное размещение коллектора. Преимуществом является высокий теплосъем. Необходима небольшая площадь для коллектора. Недостатком является бурение глубокой скважины, что требует больших вложений. Соответственно, пробуривают несколько скважин глубиной 10 метров и соединяют их. Данный способ ведет к снижению затрат на бурение.

Абсорбционные ТНУ. Главное отличие абсорбционных ТНУ от парокомпрессионных ТНУ состоит в том, что сжатие рабочего тела происходит не за счет механической энергии, а за счет термохимических процессов. В абсорбционных системах сжатие рабочей жидкости достигается за счет нагревания под давлением в системе, которая состоит из поглотителя, насоса, генератора и расширительного клапана. Пар низкого давления на выходе из испарителя поглощается абсорбентом. В результате этого процесса генерируется тепло. Раствор с помощью насоса перекачивается под давлением и попадает в генератор, где выкипает при высокой температуре. Рабочая жидкость (пар) конденса-

руются в конденсаторе, в то время, как абсорбент возвращается в поглотитель и в исходное состояние по расширительному клапану.

В своей работе я рассмотрел использование абсорбционной ТНУ в ТЭС вместо градирни и провел необходимые расчеты. Таким образом, отработанный пар после турбины конденсируется на теплообменнике. Пар отдает свое тепло незамерзающей жидкости, а та в свою очередь, проходя через испаритель, сообщает тепло ТНУ. Данный метод поможет энергоэффективнее использовать остаточное тепло в ТЭС.

Литература

1. Антипов А. В. и др. – Холодильник в вашем доме
2. Горшков В.Г. – Российские абсорбционные бромистолит. преобразователи теплоты нового поколения.
3. Галимова Л.В. – Абсорбционные холодильные машины и тепловые насосы.
4. Султангузин И. А. и др. – Тепловые насосы для российских городов
5. Попов А.В. – Оптимальное проектирование абсорбционных тепловых насосов.

УДК621.6

С.А. НАУМОВ, к.т.н., доцент,
В.Ю. СОКОЛОВ, к.т.н., доцент

Оренбургский государственный университет
460018, г. Оренбург пр.Победы 13
E-mail: teploosu@mail.ru

Увеличение полноты сгорания газовых горелок

Аннотация: в представленной работе разработана схема газовой горелки, предложена схема ее привода, рассмотрены условия выбора горелочного устройства

Ключевые слова: газовая горелка, полнота сгорания, схема привода горелочного устройства

V.Y. SOKOLOV candidate of technical Sciences, associate Professor,
S. A. NAUMOV candidate of technical Sciences, associate Professor
Orenburg state University
460018, Orenburg, pr. Pobedy 13
E-mail: teploosu@mail.ru

The increase in completeness of combustion of the gas burners

Abstract: in the present work a scheme of a gas burner, the proposed scheme of the drive, considered selection conditions of the burner

Keywords: gas burner, completeness of combustion, diagram of the drive gas-burner device

Вопрос защиты окружающей среды остро стоит перед обществом, на протяжении многих лет. И заставляет задуматься о совершенствовании

вании как подготовки топлива к сжиганию, так и самого процесса горения.

Актуальность проблемы обусловлена, в первую очередь, желанием сберечь невозобновимый, и быстро исчезающий источник энергии, такой как природный газ. Теплоэнергетика является одной из загрязняющих сфер промышленности. Это связано с огромным количеством вредных веществ в продуктах сгорания.

Газ является самым удобным, обладающим чрезвычайно высокими потребительскими качествами видом органического топлива, поэтому устройства, работающие на нем, пользуются особой популярностью. Почти все они оснащаются системами автоматики, благодаря чему достигается высокая безопасность и безотказность их работы.

Существующие виды горелок обладают широким спектром достоинств. Конструкция газовой горелки очень проста. Ее запуск занимает доли секунды и работает такая горелка практически безотказно. Газовые горелки используются для отопительных котлов или промышленного применения.

Выбор горелочного устройства имеет большое значение для правильного функционирования котла. На рынке представлены, в основном, горелки импортного производства, отвечающие всем требованиям по безопасности, экономичности и надежности. Применение той или иной марки горелки зависит, скорее всего, от уровня цены, так как уровень качества примерно одинаков для основных производителей.

Основными параметрами для подбора горелки являются: мощность котла; сопротивление котла со стороны дымовых газов; размеры топки котла.

Для комплектации газовых горелок производители предлагают различные комплекты газовой арматуры (электромагнитные клапаны, регуляторы давления, фильтры и прочее).

Большое значение играет тепловая мощность газовой горелки, которая бывает максимальной, минимальная и номинальная.

При длительной работе горелки, где газа расходуется большее количество без отрыва пламени, достигается максимальная тепловая мощность.

Минимальная тепловая мощность возникает при устойчивой работе горелки и наименьших расходах газа без проскока пламени.

При работе горелки с номинальным, обеспечивающим максимальный КПД при наибольшей полноте сжигания, расходом газа достигается номинальная тепловая мощность горелки.

Недостатком во многих газовых горелках является небольшой КПД и полнота сгорания газо-воздушной смеси.

Технический результат изобретения – повышение полноты сгорания топлива, путем турбулентности потока газо-воздушной смеси при ее сжигании, после вращения периферийного газоподводящего канала.

Указанный технический результат достигается тем, что в газовой горелке центральный канал установлен внутри периферийного канала, а центральный и периферийный газоподводящие каналы имеют перфорацию, при этом между перфорацией на внешней стороне периферийного газоподводящего канала установлены лопатки.

Работа газовой горелки осуществляется следующим образом (рис. 1) [1], предварительно подогретые воздух и газ от нагнетателя тангенциально поступают соответственно из воздухоподающего 1 и газоподающего 2 каналов во внешний газоподводящий канал 4, попадая на лопатки 9, при котором происходит смешивание и турбулизация потока воздуха и газа, смесь становится однородной. Из внешнего газоподводящего канала газ-воздушная смесь поступает во внутренний газоподводящий канал 4 через перфорацию 3. После попадания во внутренний газоподводящий канал 4 часть газо-воздушной смеси подводится на горение к соплам 7, а другая часть поступает через перфорацию 3 в канал 5 для последующего горения из сопел 6.

При попадании воздуха и газа из соответствующих подающих каналов 1 и 2 на лопатки 9, канал 4 начинает вращаться, посредством установленных подшипников скольжения 8, кроме того вращаются и сопла 7. Канал 5 остается неподвижен и вместе с ним неподвижны и сопла 6. При истечении газовой смеси из сопел 6 и 7 происходит поджог, воспламенение и горение газо-воздушной смеси. При указанном расположении сопел 6 и 7 повышается полнота сгорания потока газо-воздушной смеси при ее сжигании.

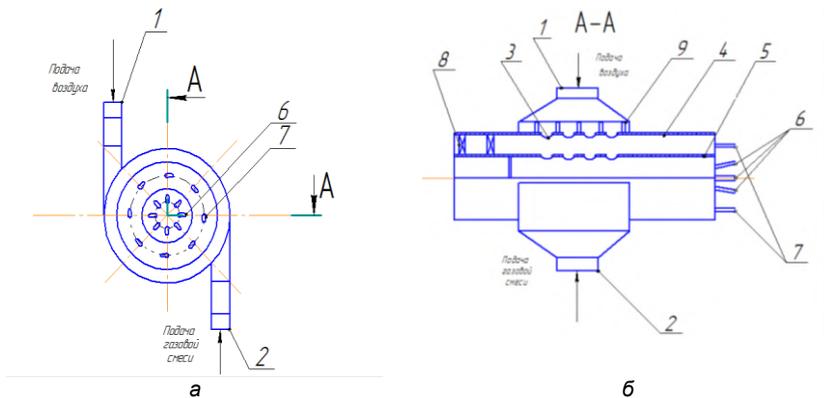


Рис. 1. Газовая горелка:

а) общий вид; б) профильный вид : 1 - воздухоподающий канал; 2 - газоподающий канал; 3 – перфорация; 4 - периферийный канал; 5 - центральный газоподводящий канал; 6,7 – сопла; 8 - подшипники скольжения; 9 – лопатки

Вращение предлагаемой горелки осуществляется следующим образом (рис. 2) [2]. Часть вырабатываемого котлом пара 1, поступает в механический привод 2, приводя во вращение цилиндрический редуктор 3, передавая крутящий момент ремням 13, и вращая газоподводящий центральный 7 и периферийный 6 каналы, через подшипники скольжения 12, пар, проходящий через турбину, попадает в пластинчатый теплообменник 2, и удаляется через конденсатопровод 14, поступающая газовая смесь с начальными параметрами (температура 1, давление 1) через трубопровод, нагревается и расширяется в пластинчатом теплообменнике 2, приобретая параметры (температура 2, давление 2), поступает в газовый трубопровод, заполняет пространство в корпусе 5, через перфорированные отверстия 8, распределяется в центральном 6, и периферийном 7 газоподводящих каналах, за счет вращения перфорированного трубопровода газоподводящих каналов, режим течения газовой смеси из ламинарного переходит в турбулентный, после чего во вращающихся газоподводящих каналах, газовая смесь, имеющая турбулентный режим течения, поступает в сопла горения 9 и 10, расположенных противонаправленно друг относительно друга. При необходимости повысить содержание воздуха в газо-воздушной смеси, происходит подача воздуха через канал 11.

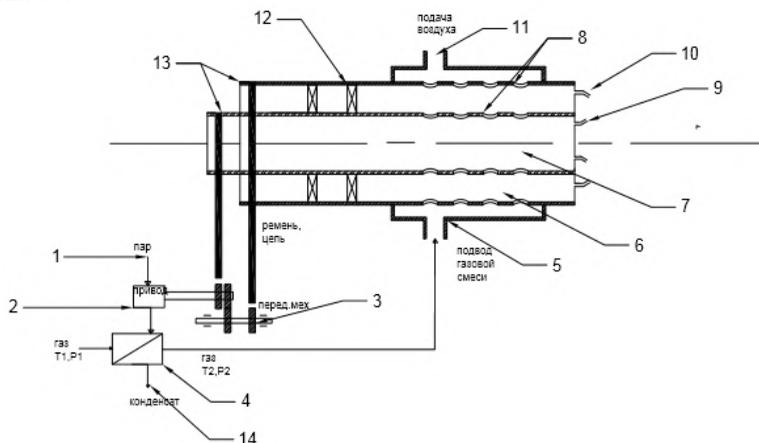


Рис. 2. Принципиальная схема газовой горелки:

1 - паропровод, 2 - турбина, 3 - цилиндрический редуктор, 4 - пластинчатый теплообменник, 5 - патрубок подвода газовой смеси, 6 - периферийный газоподводящий канал, 7 - центральный газоподводящий канал, 8 - перфорированные отверстия, 9, 10 - сопла горения, 11 - патрубок подачи воздуха, 12 - подшипники скольжения, 13 - ремни, 14 - конденсатопровод

Такой результат приводит к увеличению КПД, за счет турбулентности потока но средствами вращения газоподводящих каналов, повышается

полнота сгорания топлива, соответственно и экономия топливно-воздушной смеси.

Достигается за счет установки пластинчатого теплообменного аппарата, в котором соответственно происходит тепловое расширение подаваемой газовой смеси, вследствие чего происходит повышение экономичности и полноты сгорания топлива, путем турбулентности потока газовоздушной смеси при ее сжигании.

Рассматриваемую горелку можно отнести к горелкам с механической системой модуляции.

Преимущества модулируемых горелок:

- продление срока службы теплоагрегата;
- экономия топлива не менее 5% (по сравнению с плавно-двухступенчатыми горелками соответствующей тепловой мощности), частотное и кислородное регулирование;
- экологические нормы сжигания газа с минимальным количеством вредных выбросов в атмосферу по СО (даже до 0%) и NOx (по швейцарским, самым жестким нормам);
- широкий диапазон регулирования мощности (от 10 до 100%) и высокий КПД теплоагрегата во всем диапазоне регулирования.

Литература

1. С 1 2471118 RU F23D 14/66 (2006.01). Газовая горелка / Соколов В.Ю., Наумов С.А., Садчиков А.В., Горячев С.В.- № 2011133209/06; Заявл. 08.08.2011
2. С 2479790 RU F23D 14/62 (2006/01) «Газовая горелка» / Соколов В.Ю., Горячев С.В., Наумов С.А., Садчиков А.В., Коробков А.М., Лаврентьев А.С. - №2011129523/06; Заявл.20.04.2011

УДК 621.6

Е.А.ПИВНЕВА студентка, В.Ю. СОКОЛОВ к.т.н., доцент

Оренбургский государственный университет
460018, г.Оренбург пр.Победы 13
E-mail: liza.pivneva97@mail.ru, teploosu@mail.ru

Особенности использования индивидуальных приборов учета и тепловой энергии в многоквартирных домах

Аннотация: проведена тепловизионная съемка установленного для снятия данных распределителя тепла, составлена модель теплового поля и рассмотрены варианты наиболее эффективного способа подключения отопительных приборов в многоэтажных домах, предложены решения для эффективного распределения тепла между жильцами многоэтажных домов с использованием приборов.

Ключевые слова: распределители тепла, эффективный поквартирный учет теплоносителя, индивидуальные приборы учета тепловой энергии, системы индивидуальных тепловых счетчиков, способы эффективного распределения данных по потребленному теплу

E.A. PIVNEVA student,
V.Y.SOKOLOV candidate of technical Sciences, associate Professor

Orenburg state University
460018, Orenburg, pr Pobedy 13
E-mail: liza.pivneva97@mail.ru, teploosu@mail.ru

Features of use of individual devices the account and thermal energy in apartment houses

Abstract: thermovision shooting of heat distributor established for removal of data is carried out, the model of the thermal field is made and options of the most effective way of connection of heating devices in multi-storey buildings are considered, solutions for effective distribution of heat between residents of multi-storey buildings with use of devices are proposed

Keywords: heat distributors, the effective apartment accounting of the heat carrier, individual metering devices of thermal energy, system of individual thermal counters, ways of effective distribution of data on the consumed heat

Вопрос эффективной работы управляющих компаний многоквартирных домов в ЖКХ городов является одной из самых обсуждаемых тем в настоящее время. При этом одним из главных моментов мы считаем организацию учета потребления энергетических носителей, к которым относятся электрическая энергия, горячая и холодная вода, тепловая энергия системы отопления. Наиболее актуальным остается вопрос учета тепловой энергии, потребленной обывателями. У промышленных предприятий своя специфика генерации потребляемого энергоносителя. Поэтому мы, поставив перед собой задачу "Использования индивидуальных приборов учета тепловой энергии в многоквартирных домах", сочли её наиболее интересной для широкого круга обывателей, сталкивающихся с необходимостью оплаты потребленной тепловой энергии, исходя из квадратуры (кубатуры) жилого помещения. Если у индивидуального потребителя в частном жилом доме и возникают какие-либо проблемы с потребленной тепловой энергией, то он понимает, что поддержание температуры в жилых и нежилых помещениях и количество потребленного газа зависит только от него. А при коммунальном, компактном проживании большого количества жителей в многоэтажном доме всегда возникает масса вопросов, связанных с индивидуальными особенностями каждого жильца в отдельности. Кому-то нравится чтобы в помещении было проветрено и прохладно, кто-то, закрыв все форточки ставит дополнительные электронагревательные приборы. На разные требования потребителя юридическим ответом является с технической точки зрения оправдывающая себя цифра 18⁰С в жилом помещении в виде квартиры. Современные технические решения, используемые в системах отопления жилых помещений, позволяют изменять количество проходящего теплового носителя, установленными на батареях отопления терморегуляторами, но при этом возникает вопрос: каким образом

распределить между потребителями тепловую энергию, потребленную ими. Ведь привязка к площади становится неактуальной. Техническим решением данного вопроса является использование в тепловых системах индивидуальных тепловых счетчиков.

Несмотря на то, что во вновь возводимых зданиях система распределения теплоносителя выполнена с необходимостью поквартирного учета энергоносителя, большинство построек успели, в нашей стране, возвести до того, как этот вопрос был поднят на законодательном уровне.

Подавляющее большинство высотных построек спроектировано так, что один владелец имеет в своей квартире несколько независимых участков системы теплоснабжения. Способ разводки системы отопления называется - стояковой. Поэтому в таких домах нецелесообразна установка приборов поквартирного учета, как с технической, так и с экономической точки зрения, потому что придется вести учёт тепловой энергии при помощи нескольких квартирных теплосчетчиков.

Все дело в том, что для монтажа теплосчетчика требуется врезка в трубопровод, что изменяет гидравлический режим всей системы отопления в доме. При этом необходимо учитывать что, разность температуры теплоносителя прошедшей через один радиатор настолько мала, что эта величина может попадать в погрешность практически всех выпускаемых теплосчетчиков. И здесь немаловажную роль играет способ подключения теплоснимающего прибора (батареи) в систему. Да, при продаже в магазине указывается покупателю величина тепловой нагрузки одной секции в Вт, однако при более детальном ознакомлении с инструкцией по монтажу оборудования покупатель должен обратить внимание на возможное изменение этой цифры в меньшую сторону, так как ему предложили максимально возможную величину теплосъема при перекрестном подключении отопительного прибора. В зависимости от способа подключения радиаторов, рассматривают и количество проходящего через них теплового носителя. Основными считают три способа подключения: одностороннее подключение, нижнее и седельное подключение, перекрестное (диагональное) подключение.

Для решения проблемы с учетом тепла при работе вертикальных систем разводки отопления были созданы распределители тепла, являющиеся альтернативой теплосчетчикам. Эти устройства не уступают теплосчетчикам по точности, но стоят при этом гораздо дешевле, разница может достигать одного порядка. Радиаторные распределители – это индивидуальные компактные устройства, предназначенные для измерения температурного напора между поверхностью батареи и воздухом в помещении.

Принцип действия этих приборов основан на периодической регистрации разности температур радиатора отопления в помещении и температуры воздуха в этом же помещении, интегрируемых по времени. Два температурных датчика каждые 3-4 минуты измеряют температуру поверхности радиатора в точке его крепления и сохраняют в память раз-

ность температур поверхности радиатора и воздуха в помещении. В результате показания распределителей соответствуют количеству тепла, отданному радиатором за определенный период, измеренному в условных единицах. Показания распределителя тепла для получения снятых им калорий необходимо умножать на так называемый "радиаторный коэффициент", соответствующий данному типу и размеру отопительного прибора и "квартирный коэффициент", соответствующий расположению помещения в доме. При получении численного значения снятого с поверхности радиатора тепла следует учесть, что количество секций и тип радиатора при синхронном соотношении температур в помещении и на поверхности радиатора будут давать различные величины. Для внесения поправок в величины полученного тепла служит "радиаторный коэффициент". Особенности установки распределителей на радиаторы отопления подробно представлены в описании для специалистов монтажной организации. Для каждого типа отопительного прибора предлагается свой коэффициент. Для расчета потребленного тепла квартирой в многоэтажном доме используется и "квартирный коэффициент", т.е. расположение квартиры в доме, например, торцевая квартира на первом этаже, с северной или южной стороны и т.д.

Основную сложность при запуске подобной системы учета потребленного тепла представляет именно составление таблиц «радиаторных и квартирных» коэффициентов. Это требует от управляющих компаний и ТСЖ наличия высококвалифицированного, вежливого и терпеливого персонала, который будет проводить данную работу с жильцами дома. Кстатi, заселенность дома так же имеет немаловажное значение. Наличие программного комплекса не решает всех возникающих вопросов. Ведь программное обеспечение, применяемое для расчета оплат, и коэффициенты распределения автоматически учитываются при расчете всего потребленного тепла по отдельным квартирам. Прибор интегрирует по времени измеренную величину температурного напора и рассчитывает величину теплоотдачи отопительного прибора в пропорциональных единицах. Коэффициент перевода единиц распределителя в Гкал оказывается различным для разных зданий и разных периодов измерения. Коэффициент распределения необходимо рассчитывать за каждый учетный период путем распределения между квартирами всех затрат дома, измеренных общедомовым счетчиком тепла. Расчеты должно производить специальное программное обеспечение, в которое заложен алгоритм распределения потребленного тепла в соответствии с действующей нормативной базой. В нашем рассматриваемом случае методика расчета потребления тепла каждой квартирой утверждена Госстроем РФ (МДК 4-07.2004). Общие принципы начисления оплат по показаниям распределителей регламентированы в Постановлениях Правительства РФ № 307, 354.

Преимуществом распределителей тепла является: доступная цена, простота монтажа; отсутствие непосредственного контакта с теплоноси-

телем; возможность начала проведения расчетов с любого месяца отопительного сезона, возможность установки на систему с вертикальной разводкой. Радиаторный распределитель тепла питается от встроенной в блок литиевой батареи, бесперебойная работа системы определена производителем в 10 лет. Эффективная работа оборудования в диапазонах температуры теплоносителя от 35 до 105°C, самые точные данные о расходе тепла за 1 день или абсолютно любой указанный конкретный промежуток времени. Встроенный календарь позволяет получить данные о расходе за прошлые годы, резервирование информации об измеренных данных.

Недостаток распределителей тепла заключается в том, что они не определяют, какое количество тепла отдадут отопительные стояки. В связи с этим "неучтенное" тепло стояков управляющая компания распределяет между отдельными квартирами по тому же принципу, что и другие общедомовые затраты, - пропорционально общей площади квартир

Поэтому прежде чем устанавливать в квартирах жилого дома радиаторные распределители следует устранить все источники теплопотерь — щели под подоконниками, не утепленные входные и межтамбурные двери, промерзающие углы, не говоря уж о старых деревянных окнах, так как температура воздуха в помещении это только один из параметров «зоны комфорта», сюда еще следует включать скорость аспирации и относительную влажность воздуха в помещении, а эти параметры очень индивидуальны.

При проведении работы по выбранной теме нами была выполнена тепловизионная съемка объектов жизнеобеспечения. Для считывания параметров теплоносителя установлен прибор Данфосс INDIV-5 (рис. 1). Теплоноситель проходит через радиатор неравномерно, это хорошо видно при обработке данных. В зависимости от конкретной точки установки радиаторного распределителя он будет брать за основу температуру именно в данной точке. Чем выше будет установлен радиаторный распределитель на батарее, тем большее значение он будет показывать, а значит и выше будет оплата за потребленные тепловые ресурсы. И наоборот, чем ниже будет установлен радиаторный распределитель, тем ниже будет температура в данной точке, и меньшей будет сумма оплаты за потребленный ресурс. Таким образом, возникает вопрос: в каком конкретном месте на конкретной конструкции должен быть установлен радиаторный распределитель тепла? Как это место определяется специалистом по монтажу? Берется какая-то средняя точка по центру радиатора, или выбирается любая произвольная точка по предпочтению собственника жилья или мастера, который занимается монтажом прибора?

Ведь для каждого конкретного случая место установки радиаторного распределителя тепла будет индивидуальным. Но в зависимости от конкретного места закрепления счетчика потребители будут платить разную цену за одно и тоже количество потребленного ресурса.



Рис. 1. Фото и тепловая картинка алюминиевого радиатора, подключенного к системе односторонним типом, на радиаторе установлен индикатор тепла Данфосс INDIV-5

Анализ полученных в ходе выполнения работы данных позволяет сделать вывод о том, что для организации в многоквартирном доме системы поквартирного учета тепловой энергии с использованием распределителей тепла требуется выполнение нескольких требований: расчеты с энергоснабжающей компанией должны вестись с использованием общедомового счетчика тепла; на всех радиаторах отопления вместе с распределителями должны быть установлены термостатические регуляторы, распределителями тепла должны быть оборудованы все 100%/жилых помещений.

При этом следует учесть, что существует принципиальная разница о способах сбора данных о потребленном носителе. Например, INDIV-5 от Данфосс, предназначен для визуального считывания данных с дисплея самим потребителем, и в какой промежуток времени из предлагаемого для предоставления данных он это сделает неизвестно даже ему. INDIV-5R от Данфосс оснащен радиомодулем, работающем на разрешенной частоте 868,95 МГц, мощность передатчика 10мВт, для беспроводной передачи накопленных показаний на сетевые узлы измерительной радиосистемы INDIV AMR. А это позволяет оператору получить, нажатием кнопки на пульте управления, данные достаточные для выставления счета за потребленное тепло от всех потребителей именно в данный момент времени без оговорок «я забыл», «я не помню», «поставьте любые данные». Разница по стоимости в устанавливаемом оборудовании легко окупается его эффективным использованием, но потребителям тепла это необходимо разъяснить.

Литература

1. **Иночкин Е.В.** Индивидуальный учет тепловой энергии. --//Энергосбережение.- 2013- №3
2. Методика расчета потребления тепла каждой квартирой, утверждена Госстроем РФ (МДК 4-07.2004). Методика одобрена и рекомендована к применению на территории Российской Федерации Решением Научно-технического совета Госстроя России № 01-НС-12/1 от 13.09.2003 г.

УДК 628.8

В.К. ПЫЖОВ¹, к.т.н., профессор,
А.В. КОНОВАЛОВ², к.т.н., доцент,
Н.Н. СМИРНОВ³, доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

E-mail: pvk@pte.ispu.ru¹, konovalov@pte.ispu.ru², nsmirnov@bk.ru³

О целесообразности применения централизованного теплоснабжения при создании микроклимата системами кондиционирования

Аннотация. В статье рассматривается методика проектирования воздухонагревателей первой и второй ступени центральных кондиционеров, показывающая несостоятельность центрального качественного регулирования при 2-х трубных тепловых сетях, и обосновывается переход на децентрализованное теплоснабжение с графиком качественного регулирования для каждого потребителя.

Ключевые слова: централизованная и децентрализованная система теплоснабжения, температурный график качественного регулирования, срезка, излом, воздухонагреватели систем кондиционирования.

V.K. PYZHOV Candidate of Engineering, professor,
A.V. KONOVALOV Candidate of Engineering, docent,
N.N. SMIRNOV, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34

E-mail: pvk@pte.ispu.ru¹, konovalov@pte.ispu.ru², nsmirnov@bk.ru³

Expediency of application of the centralized heat supply when creating a microclimate by air conditioning systems

Abstract. The article describes the method for designing air heaters of the first and second stages of central air conditioners, showing the inconsistency of central regulation in 2 pipe heating networks, and justifies the transition to decentralized heat supply with a schedule of regulation of thermal load by temperature for each consumer.

Key words: centralized and decentralized heat supply system, temperature schedule, cutting, air heaters of air conditioning systems.

Ориентация специалистов действующими нормативными документами на использование для систем отопления, вентиляции и кондиционирования, горячего и технологического водоснабжения центральных систем теплоснабжения с двухтрубными сетями с «изломом» и «срезкой» графика качественного регулирования, построенного с большими допущениями для системы водяного отопления приводит к недопу-

стимулому отклонению параметров воздуха и необоснованному перерасходу энергии [1].

В большинстве регионов центра России принят график качественно-регулируемого регулирования ($\tau_1/\tau_2 = 150/70$ °С) со «срезкой» графика при температуре 120 °С (для обеспечения работоспособности добавок, снижающих коррозию внутренней поверхности труб и повышения срока службы пенополиуретановой тепловой изоляции) и «изломом» графика качественно-регулируемого регулирования (для обеспечения работы закрытой системы ГВС) при температуре в подающем трубопроводе $\tau_1 = 70$ °С.

Следует отметить, что как «излом», так и «срезка» температурного графика качественно-регулируемого регулирования параметров теплоносителя в подающем и обратном трубопроводе может привести к нарушению режима теплоснабжения и снижению надежности работы воздухоподогревателей, особенно при отрицательных температурах наружного воздуха.

Данные для построения графика, принятые по [1, 2], имеют следующие допущения и неточности: расчетные выражения для построения графика центрального качественно-регулируемого регулирования не используют внутренние тепловые выделения и поступления теплоты от солнечной радиации; не учитываются затраты теплоты на нагрев инфильтрующегося наружного воздуха; табличные данные в [2] получены для температуры воздуха в помещении $t_b^x = 18$ °С; график качественно-регулируемого регулирования получен только для систем водяного отопления с отдачей теплоты естественной конвекцией в отопительных приборах конвективного типа («плинтусных»); применение графика центрального качественно-регулируемого регулирования для проектирования воздухонагревателей, теплоотдача в которых со стороны греющего теплоносителя (теплофикационной сетевой воды) и нагреваемого воздуха соответствует вынужденной конвекции и при наличии отмеченных выше допущений, может привести к недопустимой погрешности.

В предлагаемой работе исследуется погрешность от применения отмеченного графика центрального качественно-регулируемого регулирования с применением «срезки» (при температуре 120 °С) и «излома» (при температуре 70 °С) при использовании двухтрубных схем теплоснабжения системы кондиционирования и горячего водоснабжения.

Проверка проводилась с использованием алгоритма, описанного в [1] для нескольких расчетных режимов (особое внимание при выборе расчетных режимов уделяется областям с «излома» и «срезкой» графика качественно-регулируемого регулирования).

Оценивалась целесообразность перехода на 4-х трубные сети и выполнение уточнения исходных данных и алгоритма получения температурного графика, адекватно описывающего процесс качественно-регулируемого регулирования теплоотдачи поверхностными воздухонагревателями типового центрального кондиционера КТЦЗ-63.

На рис. 1 для г. Владимир ($t_{н}^x = -28\text{ }^{\circ}\text{C}$) приведен температурный график качественного регулирования со «срезкой» при температуре $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ и «изломом» при температуре $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ для обеспечения работы закрытой системы ГВС и теплоснабжения воздухонагревателя.

Проверка эффективности теплоснабжения были проведены для шести расчётных режимов.

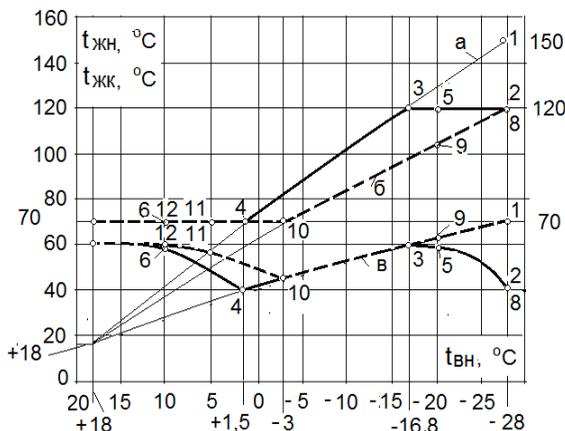


Рис. 1. Температурные графики центрального качественного регулирования с «изломом» при температуре $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для обеспечения работоспособности закрытой системы ГВС): **а/в** и **б/в** – температурный график $\tau_1 / \tau_2 = 150 / 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $\tau_1 / \tau_2 = 120 / 70\text{ }^{\circ}\text{C}$; 1-12 – расчетные режимы; $t_{вн,i}$, $t_{вк,i}$, $t_{жн,i}$, $t_{жк,i}$ – температура воздуха и греющего теплоносителя (теплофикационной воды) на входе и выходе из воздухоохладителя в i -ом расчетном режиме

Оценка работы системы теплоснабжения по принятому температурному графику проводилась по расчетному запасу поверхности теплообмена $\Delta \bar{A}_i \cdot 100, \%$, воздухонагревателя первой ступени кондиционера КТЦ3 по выражению [1,3]

$$\left(A - A_i^P \right) / A_i^P \cdot 100 = \left[\left(\theta_{в,i}^y - \theta_{в,i}^p \right) / \theta_{в,i}^p / \left(1 - \left(\theta_{в,i}^y + \theta_{ж,i}^y \right) / 2 \right) - 0,1 \right] \cdot 100, \quad (1)$$

где A , A_i^P – установленная (фактическая) и требуемая (расчетная) поверхность теплообмена воздухонагревателя в i -м расчетном режиме, m^2 ; $\theta_{в,i}^p$, $\theta_{ж,i}^p$, $\theta_{в,i}^y$, $\theta_{ж,i}^y$ – расчетные и фактические относительные перепады температур по воздуху и жидкости для i -го расчетного режима соответственно; 0,1 – коэффициент, учитывающий допустимое по техническим условиям на кондиционеры КТЦ3 снижение коэффициента теплопередачи в процессе эксплуатации [1].

Проведенные расчеты показали, что «срезка» графика качественно-регулирующего при температуре наружного воздуха минус 28 °С (2-й и 3-й режимы) вызывает «недогрев» воздуха (недостача поверхности нагрева соответственно минус 13,7 и минус 9,4 %) при четырехрядном исполнении воздухонагревателя. «Излом» же графика качественного регулирования при температуре $t_{вн,4} = +1,5$ °С (для обеспечения работы ГВС ($t_{жн,i} = 70$ °С)) приводит к «запасу» поверхности теплообмена в 6-м режиме 193 %, что значительно превышает допустимый положительный 10 % запас поверхности [1].

Для снижения или повышения «запаса» поверхности теплообмена принималось решение, оставляя тепловые сети двухтрубными, изменить температурный график качественного регулирования температуры теплоносителя с $\tau_1/\tau_2 = 150/70$ °С на график качественного регулирования $\tau_1/\tau_2 = 120/70$ °С с «изломом» при 70 °С. Исходные данные для построения графика (рис. 1) приняты по [2].

Анализ полученных результатов (режимы с 8 по 12 на рис.2) свидетельствует о том, что применение «излома» графика центрального качественного регулирования в двухтрубных системах теплоснабжения приводит к значительному превышению величины допустимого запаса поверхности. При температурах наружного воздуха +5 и +10 °С, находящихся в области «излома», запас поверхности равен соответственно 72,0 и 203,0 %. Следует отметить, что переход с графика качественного регулирования 150/70 на график 120/70 °С увеличивает зону «излома». По результатам выполненных расчетов рекомендуется использовать источник теплоснабжения с графиком регулирования $\tau_1/\tau_2 = 120/70$ °С без «изломов» и «срезок».

Учитывая, что в большинстве регионов существующие системы централизованного теплоснабжения работают в двухтрубном исполнении с графиками центрального качественного регулирования с «изломом» и «срезкой» и расчетной температурой внутри помещений 18 °С, построенных на основе [1-3], целесообразно осуществить переход на использование децентрализованных источников теплоснабжения с отдельными контурами теплоснабжения воздухонагревателей первой и второй ступени подогрева и водонагревателей ГВС.

Для получения графика качественного регулирования необходимо решить систему уравнений (2) – (6):

$$Q_{i,j}^x = L_{плн} \cdot \rho_v \cdot (h_{вк,i}^x - h_{вн,i}^x) / 2; \quad (2)$$

$$Q_{i,j}^x = G_{ж} \cdot c_{ж} \cdot (t_{жн,i}^x - t_{жк,i}^x); \quad (3)$$

$$Q_{i,j}^x = A_i^p \cdot k_{ктц} \cdot \Delta t_{ср,i}; \quad (4)$$

$$k_{ктц} = a \cdot (v_v \cdot \rho_v)_{ктц}^m \cdot v_{ж,ктц}^r \cdot 10^{-3}; \quad (5)$$

$$\Delta t_{\text{ср},j} = (t_{\text{жн},i} + t_{\text{жк},j}) / 2 - (t_{\text{вк},i} + t_{\text{вн},j}) / 2. \quad (6)$$

Решение системы уравнений (2)-(6) позволило получить график децентрализованного (автономного) качественного регулирования параметров теплоносителя, подаваемого в воздухонагреватели кондиционера КТЦ3-63 (рис. 2).

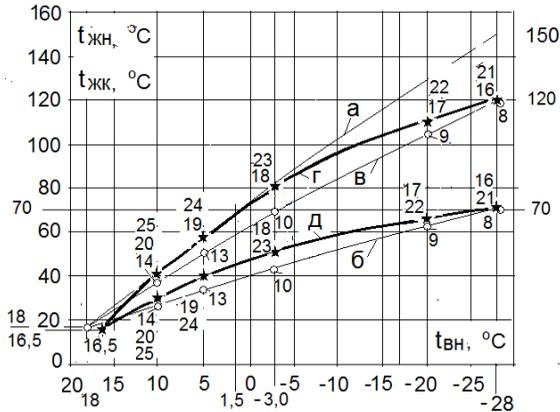


Рис. 2. Результаты решения системы уравнений (2) – (6) для получения температурного графика $\tau_1 / \tau_2 = 120 / 70$ °C децентрализованного качественного регулирования

Выводы: Определение относительного изменения температуры нагреваемого воздуха и греющего теплоносителя позволило сделать вывод, что переход на децентрализованное теплоснабжение воздухонагревателей первой ступени кондиционера КТЦ-63 с качественным графиком регулирования, построенным после решения системы уравнений (2) - (6) (рис. 2), позволяет обеспечить передачу требуемого количества теплоты при практически неизменном качестве и допустимом «запасе» поверхности. Переход от теплого к холодному периоду года происходит при температуре наружного воздуха равной 16, 5 °C.

Следует отметить, что при централизованном теплоснабжении подача теплоты прекращается при температуре наружного воздуха равной 8 °C, в то время как согласно пусть некорректного, но все же графика качественного регулирования отключение теплоснабжения необходимо производить при температуре плюс 18 °C (рис.1).

Литература

1. Пыжов, В.К. Проектирование и эксплуатация систем кондиционирования, вентиляции и отопления: учебное пособие /В.К. Пыжов, ГОУВПО «Ивановский

государственный энергетический университет имени В.И. Ленина. – Иваново, 2011. – 568 с.

2. **Справочник** по наладке и эксплуатации водяных тепловых сетей / В.И. Манюк, Я.И. Каплинский, Э.Б. Хиж, А.И. Манюк, В.К. Ильин; 2-е изд., – М.: Стройиздат, 1982. – 215 с.

3. **Пыжов, В.К.** Проектирование и эксплуатация систем кондиционирования воздуха (для самостоятельной работы при выполнении РГР): учебное пособие / В.К. Пыжов, В.В. Смирнов, Н.Н. Смирнов; ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2017. – 248 с. (в печати).

УДК 620.93

А.В. САДЧИКОВ¹, к.т.н. ,доцент, С.В. МИТРОФАНОВ², к.т.н., доцент

ФГБОУ ВО "Оренбургский государственный университет"

460018 г. Оренбург, пр. Победы 13

E-mail: lyohantron@mail.ru¹, mitser2002@mail.ru²

Водородная энергетика: проблемы и перспективы

Аннотация. рассмотрены вопросы развития экологически чистых технологий в современной энергетике, произведен анализ основных направлений водородной энергетике, выделены наиболее значимые проблемы внедрения водородных технологий в энергосистему, показаны ключевые перспективы развития водородной энергетике

Ключевые слова: водородная энергетика, топливные элементы, водород

A.V. SADCHIKOV, Ph.D. , Associate Professor,
S.V. MITROPHANOV, Ph.D., Associate Professor

FGBOU VO "Orenburg State University"

460018, Orenburg city, Victory Ave. 13

E-mail: lyohantron@mail.ru¹, mitser2002@mail.ru²

Hydrogen Energy: Problems and Prospects

Abstract. The issues of development of environmentally friendly technologies in modern power engineering are considered, the analysis of the main directions of hydrogen energy is made, the most significant problems of introduction of hydrogen technologies into the energy system are highlighted, key prospects of development of hydrogen energy are shown

Key words: hydrogen energy, fuel cells, hydrogen

Введение. Устойчивое развитие человеческой цивилизации неизбежно требует изменения структуры энергетике, разработки и внедрения новых безуглеродных энергетических технологий для уменьшения выбросов парниковых газов и стабилизации глобального изменения климата, вызванного антропогенными воздействиями на окружающую среду. Одним из возможных вариантов

развития энергетики будущего может стать использование универсального и экологически чистого энергоносителя – водорода [1,2,5]. Извлекаемые запасы водорода в составе углеводородных ресурсов, воды и биомассы в настоящее время практически неограниченны [4]. Источником для синтеза водорода могут служить природный и искусственные газы, продукты переработки нефти, свалочный газ и биометан [6,7].

Актуальность

Водородная энергетика основывается на известных технологиях преобразования энергии в электрохимических генераторах или так называемых топливных элементах. В качестве исходного энергоресурса используется водород, как в чистом виде, так и в виде металлгидридов и других химических соединений - геттеров водорода. В результате химических реакций производится электрическая энергия и выделяется тепло, причем процесс генерации характеризуется практически полным отсутствием вредных выбросов таких, как оксиды азота, углерода и серы, конечным продуктом переработки является вода и водяной пар.

Во большинстве развитых стран мира, таких, как США, Япония, страны Евросоюза, программы по развитию водородной энергетики являются неотъемлемой частью энергетической стратегии развития. В Российской Федерации развитие технологий водородной энергетики и их интеграция с традиционными технологиями единой энергосистемы осложняется сложившимися условиями на российском рынке энергоресурсов, особенностями экономики России и ее энергетической политики, основу которой составляют добыча и переработка природного газа и нефтяных углеводородов.

Альтернативой водородной энергетике выступает концепция «электрического мира». Согласно этой концепции, практически все потребности в энергии будут удовлетворяться за счет единственного энергоносителя, экологически безопасного и удобного в применении, электроэнергии.

Проблемы

В настоящее время наряду с аргументами в пользу перехода в перспективе к «водородной экономике» существует мнение о ее неэффективности в принципе. Главный аргумент – это утверждение о ее низком КПД. Сегодня КПД водородной системы составляет 19-33 %, тогда как КПД электрической системы достигает значения 69%. Это основная проблема водородной энергетики. Но не рассматривается основной для сравниваемых энергоносителей параметр – время, в течение которого им необходимо аккумулировать. В результате некоторых расчетов выяснилось, что при краткосрочном аккумулировании энергии предпочтительнее оказывается электрическая система, при долгосрочном – водородная.

Перспективы

Таблица 1. Энергоемкость основных видов энергетического топлива

Показатель энергоемкости	Вид энергетического топлива				
	Водород	Природный газ	Бензин	Дизельное топливо	Метанол
Весовой, кВт·ч/кг	39,45	15,45	13,36	10,17	6,47
Объемный, кВт·ч/м ³ (при атмосферном давлении)	3,53	11,11	9,89	8,3	4,99

Сравнительный анализ энергоемкости основных видов традиционного энергетического топлива и водорода позволяет сделать вывод о существенном преимуществе последнего по значению удельной весовой характеристики. С другой стороны, низкая плотность обуславливает сравнительно небольшую энергоемкость водорода по величине удельной объемной характеристики. Это обстоятельство вызывает необходимость использования водорода в сжатом или сжиженном состоянии. Решение проблемы хранения и транспортировки водорода как энергоносителя представляется одной из приоритетных задач в водородной энергетике. В настоящее время разработаны и опробованы технологии, позволяющие значительно сократить объемы водорода и повысить эффективность работы водородных электрохимических генераторов и топливных элементов [2,4]. Не менее значимым и перспективным направлением в водородной энергетике является повышение КПД топливных элементов за счет использования их в когенерационных и тригенерационных циклах [3].

Вывод

В настоящее время не существует единого мнения о перспективах применения водорода в энергетике будущего. Показано, что при краткосрочном (<50-110 часов) аккумулирования энергии предпочтительнее оказывается электрическая система, при долгосрочном – водород. Можно предположить, что в энергетике будущего будут сочетаться элементы концепции «водородной экономики» и «электрического мира». В Российской Федерации создание благоприятных условий для развития технологий водородной энергетике и их внедрения в хозяйственный оборот должно быть основано прежде всего на создании эффективной нормативно-правовой стимулирующей базы, а также на поиске новых научных и технических решений в области хранения, транспортировки и синтеза водорода.

Литература

1. **Беляев Л.С.**, Марченко О.В., Филиппов С.П., Соломин С.В., Степанова Т.Б., Кокорин А.Л. Мировая энергетика и переход к устойчивому развитию. Новосибирск: Наука. Сиб. издат фирма РАН, 2000. 269 с.
2. **Беляев Л.С.**, Марченко О.В., Соломин С.В. Исследование долгосрочных тенденций развития энергетике России и мира / Известия РАН. Энергетика. 2011. №2. С. 3-11.
3. **Григорьев С.А.**, Григорьев А.С., Кулешов Н.В., Фатеев В.Н., Кулешов В.Н. Энергоустановка с когенерацией электричества и тепла на основе возобновляемых источников энергии и электрохимических водородных систем / Теплоэнергетика, 2015, № 2, С. 3-10
4. **Дуников Д.О.**, Борзенко В.И., Малышенко С.П., Блинов Д.В., Казаков А.Н. Перспективные технологии использования биоводорода в энергоустановках на базе топливных элементов / Теплоэнергетика, 2013, №3, С. 48-57
5. **Пономарев-Степной Н.Н.**, Столяревский А.Я. Атомно-водородная энергетика / Альтернативная энергетика и экология. 2004. №3 (11). С. 5-10.
6. **Садчиков А.В.** Конверсия биометана в водород на биогазовой станции, использующей комбинированное загрузочное сырье / Альтернативная энергетика и экология. 2016. – № 19–20 (207–208), С. 62–68.
7. **Садчиков А.В.**, Соколов В.Ю., Кокарев Н.Ф., Наумов С.А. Обеспечение энергетической независимости и экологической безопасности полигонов ТКО / Альтернативная энергетика и экология. 2016. № 15–18 (203–206), С. 104–111.

УДК 628.8

Н.Н. СМИРНОВ¹, доцент, В.К. ПЫЖОВ², к.т.н., профессор,
В.М. ЗАХАРОВ, к.т.н., профессор,
Г.И. ПАРФЕНОВ, студент, В.И. АНГЕЛОВ, студент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: *nsmirnov@pte.ispu.ru¹, pvk@pte.ispu.ru²*

Целесообразность применения окон с теплоотражающими экранами при создании динамического микроклимата в помещениях промышленных предприятий

Аннотация. Определена эффективность применения разработанных конструкций окон с регулируемым сопротивлением теплопередаче при работе систем обеспечения динамического микроклимата для промышленных предприятий.

Ключевые слова: динамический микроклимат, окна с теплоотражающими экранами.

N.N. SMIRNOV, docent, V.K. PYZHOV, Candidate of Engineering, professor,
V.M. ZAKHAROV, Candidate of Engineering, professor,
G.I. PARFENOV, student, V.I. ANGELOV, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya st., 34
E-mail: *nsmirnov@pte.ispu.ru¹, pvk@pte.ispu.ru²*

Expediency of using windows with heat-reflecting screens when creating a dynamic microclimate in premises of industrial enterprises

Abstract. The effectiveness of using designed windows with controlled resistance to heat transfer during the operation of dynamic microclimate systems for industrial enterprises is determined.

Key words: Dynamic microclimate, windows with heat-reflecting screens.

Среди затрат топливно-энергетических ресурсов на промышленных предприятиях России издержки на поддержание необходимых параметров микроклимата помещений составляют от 10 % (предприятия нефтеперерабатывающей, химической отрасли) до 30-50 % (машиностроительные, электротехнические предприятия).

В промышленном производстве с монотонным и напряжённым характером работы стабильные параметры микроклимата повышают утомляемость персонала и отрицательно сказываются на производительности труда. Система динамического микроклимата (ДМ), повышающая работоспособность за счёт возбуждения центральной нервной системы, подаёт в помещение воздух с параметрами, которые непрерывно меняются

во времени. Следовательно, разработка и применение энергосберегающих мероприятий при поддержании динамического микроклимата в промышленных зданиях позволит снизить себестоимость производимой в России продукции.

Сотрудниками ИГЭУ были разработаны и запатентованы конструкции окон с теплоотражающими экранами рулонного, жалюзийного и панельного типа, выполненные из металла, которые значительно снижают тепловые трансмиссионные потери. Применение экранов целесообразно в тёмное время суток или в отсутствии людей.

В ходе математического моделирования и физических экспериментов было доказано, что в окнах с теплоотражающими экранами предусмотрено не только двухпозиционное регулирование сопротивления теплопередаче R_0 за счёт перемещения экранов, но, как видно из данных моделирования (рис.1, а), приведенное (и термическое) сопротивление теплопередаче в большей степени зависит от разности температур между внутренним и наружным воздухом Δt , причём чем больше количество установленных экранов, тем более явно проявляется эта зависимость. Величина тепловых трансмиссионных потерь через окно также является нелинейной величиной (см. рис. 1, б).

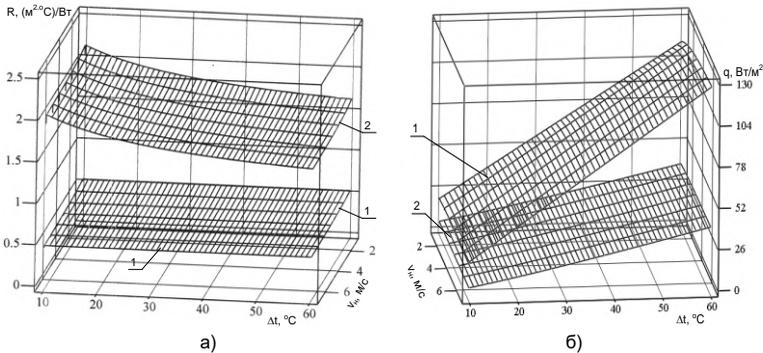


Рис. 1. Зависимость приведенного сопротивления теплопередаче R (а) и удельных тепловых потерь q (б) светопрозрачной зоны окна при использовании СП формулой 4M1x10x4M1x10x4M1 в случае естественной конвекции на внутренней стороне: 1 – без экранов (контроль); 2 – снаружи установлено 3 металлических экрана

На основе физического и компьютерного моделирования (с разработкой программного продукта) были выведены выражения, позволяющие найти текущее приведенное сопротивление окна с теплоотражающими экранами с учётом некоторых параметров внутреннего и наружного воздуха. Так, для двухкамерного стеклопакета формулой 4M1x10x4M1x 10x4M1 и трёх теплоотражающих экранов приведенное

сопротивление теплопередаче центральной зоны стеклопакета можно определить по формуле:

$$R_o^{cm}(\Delta t, v_e, v_H) = 1,06 + \frac{1}{9,6 + 3,8 \cdot v_e} + \frac{22,3}{\Delta t + 17,9} + \frac{1}{7,34 \cdot v_H^{0,656} + 3,78 \cdot e^{-1,91 \cdot v_H}}, \quad (1)$$

где Δt - разность между температурами внутреннего и наружного воздуха, °С; v_e - скорость воздуха на внутренней поверхности окна, м/с; v_H - скорость воздуха на наружной поверхности окна, м/с.

На рис. 2 приведены данные моделирования теплообмена через окно для промышленного здания, расположенного в Москве (для условий января), при использовании экранов, понижении температуры внутреннего воздуха в нерабочее время и применении СКВ по поддержанию динамического микроклимата.

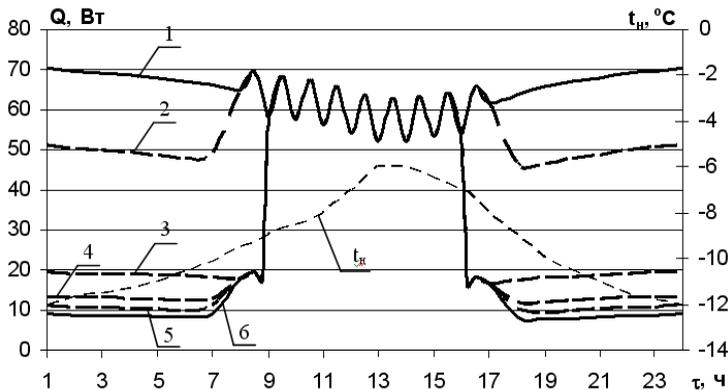


Рис. 2. Изменение тепловых потерь Q через 1 м^2 окна в течение суток: 1 – контроль; 2 – при понижении температуры внутреннего воздуха до $t_{\text{деж}} = 12 \text{ °C}$; 3 – при использовании в темное время суток экранов; 4 – при использовании в темное время суток экранов и понижении температуры внутреннего воздуха до $t_{\text{деж}} = 12 \text{ °C}$; 5 – при использовании в темное время суток экранов и минимальной температуры внутреннего воздуха $t_{\text{деж. мин}}$; 6 – при использовании в темное время суток экранов, $t_{\text{деж. мин}}$ и осушки воздуха; t_n – температура наружного воздуха.

Была разработана математическая модель динамического микроклимата промышленного здания с регулируемым сопротивлением теплопередаче окон, учитывающая нелинейную зависимость сопротивления теплопередаче светопрозрачной конструкции от параметров внутреннего и внешнего воздуха и изменяемой в течение суток конструкции окна, а также определена энергетическая эффективность использования теплоотражающих экранов в окнах и дополнительного снижения температуры воздуха в нерабочее время. Снижение тепловых трансмиссионных по-

терь за счёт применения экранов в окнах и понижения температуры воздуха в нерабочее время позволяет значительно повысить энергетическую эффективность работы систем по поддержанию динамического микроклимата и на 30-40 % понизить годовые затраты теплоты и холода.

УДК 621.311.

В.П. СОЗИНОВ, д.т.н., профессор

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: soz@pte.ru

Регулирование производительности систем аспирации

Аннотация: разработана схема автоматического регулирования производительности системы аспирации. Она дает возможность удалять из производственного помещения минимального количества воздуха.

Ключевые слова: трубопровод, вентилятор, клапан, коллектор, воздухоочиститель.

V.P.SOZINOV, Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power University
153033, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: soz@pte.ru

Aspiration systems productivity monitoring

Abstract. The scheme of aspiration systems productivity automated monitoring was developed. It gives the opportunity to remove minimum air quantity out of the operating area.

Key words: bypass, fan, valve, receiver, air cleaner

Системы аспирации используются в различных отраслях промышленности, например, в деревообрабатывающей и предназначены для удаления от технологического оборудования воздуха с отходами производства в виде пыли и более крупных частиц.

Для изменения производительности систем аспирации применяются различные схемы автоматического регулирования, которые контролируют давление в коллекторе и воздействуют на исполнительный механизм с целью увеличения (уменьшения) гидравлического сопротивления определенного участка трубопроводной сети или скорости вращения рабочего вентилятора. Возможно сочетание таких схем если реализуется двухконтурное регулирование.

Исследование таких систем выявило следующий недостаток. Он связан с тем, что датчик давления поддерживает не полное давление в коллекторе, а статическое. Следовательно, при значительном количестве

отключенных всасывающих трубопроводных ответвлений динамическое давление существенно падает и это вызывает рост расхода воздуха во включенных всасывающих трубопроводных ответвлениях против необходимого. В результате повышается потребление электроэнергии приводом вентилятора, в производственное помещение требуется подать больше воздуха. Непроизводительные затраты ещё больше увеличиваются в отапливаемый период года, когда приточный воздух приходится нагревать.

Этот недостаток будет устранен, если схема автоматического регулирования производительности системы аспирации будет поддерживать не разрежение в коллекторе, а в одном из его входных патрубков (рис. 1).

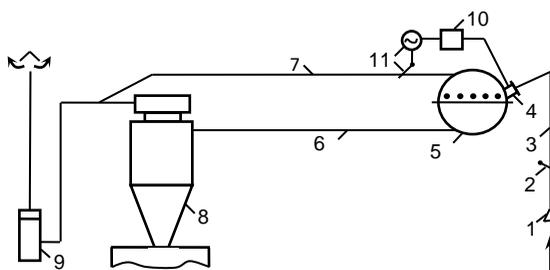


Рис. 1.

- 1 – приёмник отходов; 2 - отсеченный клапан; 3 – всасывающее трубопроводное ответвление; 4 – входной патрубок коллектора для подсоединения всасывающего трубопроводного ответвления; 5 – коллектор; 6 – транспортный трубопровод; 7 – трубопровод отбора воздуха; 8 – воздухоочиститель; 9 – вентилятор; 10 – датчик давления (разрежения); 11 – регулирующий клапан с исполнительным механизмом

Система работает следующим образом. Если какое-то всасывающее трубопроводное ответвление отключается, то в коллекторе изменится разрежение, а также и в его входных патрубках. Датчик давления фиксирует данное отклонение и подает сигнал на исполнительный механизм, который в определенной степени прикроет заслонку клапана, установленного в трубопроводе отбора воздуха. В результате разрежение в входных патрубках коллектора восстановится и из помещения будет удаляться только необходимое количество воздуха.

Литература

1. Созинов В.П. Аспирация в АПК. – Иваново: Издательство «СТИМУЛ». – 1996 г.

УДК 621.6

В.Ю. СОКОЛОВ, к.т.н., доцент,
С.А. НАУМОВ, к.т.н., доцент
Оренбургский государственный университет
460018, г. Оренбург пр.Победы 13
E-mail: teploosu@mail.ru

Использования энергии сжатого воздуха для работы когенерационных систем жизнеобеспечения удаленных потребителей

Аннотация: разработана схема системы жизнеобеспечения удаленных потребителей, в которой основным энергетическим носителем является сжатый воздух, рассмотрены вопросы использования нескольких альтернативных вариантов работы системы

Ключевые слова: сжатый воздух, когенерационная установка, особенности работы винтовых компрессоров, пневмоинструменты.

V.Y. SOKOLOV, candidate of technical Sciences, associate Professor,
S. A. NAUMOV, candidate of technical Sciences, associate Professor

Orenburg state University
460018, Orenburg, pr. Pobedy, 13
E-mail: teploosu@mail.ru

Uses of energy of compressed air for works of the cogeneration life support systems of removed consumers

Abstract: the scheme of a life support system of removed consumers in which the main power carrier is compressed air is developed, questions of use of several alternative options of work of system are considered

Keywords: compressed air, cogeneration installation, features of operation of screw compressors, pneumotools.

В настоящее время специалистами энергетиками изучаются самые разнообразные способы получения, транспортирования и накопления различных видов энергетических носителей. К ним относят – электрическую энергию, холодную и горячую воду, сжатый воздух. Последний представленный вид энергетического носителя в последнее время можно считать незаслуженно обойденным его предшественниками по списку.

При проектировании систем жизнеобеспечения удаленных потребителей, к которым может быть отнесена молочно-товарная ферма вынесенная далеко за пределы поселка, нефте- или газоразведывательное подразделение предприятия по добыче углеводородов или вывзялись осваивать так называемый «дальневосточный гектар» и так далее, то чаще всего за основу системы жизнеобеспечения берут типовой проект в основе которого будет лежать привычная для монтаж-

ных организаций система освещения и электроснабжения, путем потребления напряжения в 0,4 КВ. При этом система отопления состоит из котельного агрегата, или каскада котлов, в зависимости от типа производства, и необходимой для потребления мощности, в лучшем случае работающих на нескольких видах топлива. При этом современные требования по проектированию обязывают увязать эту систему в когенерационную установку работающую по комбинированному циклу получения тепловой и электрической энергии. Но следует помнить, что при эксплуатации существующих систем жизнеобеспечения одной из главных проблем можно считать накопление энергии без расходования первичного энергоносителя. В системах теплоснабжения эти вопросы частично решаются за счет использования твердотельных или жидкостных теплонакопителей, например источник тепловой энергии покрывают слоем талькомагнезита. Для накопления и дальнейшего потребления электрической энергии чаще всего используют группу аккумуляторных батарей. Данное техническое решение задачи очень сильно ограничено как по габаритному размеру выбираемого накопителя, так и по мощности подключаемого в работу оборудования. При этом следует заранее учесть очень большое количество вопросов возникающих при эксплуатации и обслуживании системы электрохимических накопителей, которые если и не очень капризны в обслуживании, то крайне недолговечны. А самое главное препятствие в работе - полнота набираемого заряда и время его накопления. Следует, обязательно, располагать электрохимические накопители в отапливаемом помещении, поскольку отрицательные температуры окружающей среды сильно снижают надежность этих систем. Сотрудниками кафедры электро- и теплоэнергетики Оренбургского государственного университета в ходе выполнения выпускных квалификационных работ, совместно с будущими специалистами теплоэнергетиками, была рассмотрена возможность использования энергии сжатого воздуха для работы когенерационных систем жизнеобеспечения удаленных потребителей. Схема когенерационной установки и выглядит следующим образом.

Первичным источником энергии считаем ветроустановку с вертикальным расположением ротором Дарье. Использование данной установки позволяет получать наибольший коэффициент загрузки. При попадании ветрового потока на лопасти машины появляется момент вращения, который предлагается полезно использовать для привода маслозаполненного винтового компрессора, расположенного в непосредственной близости от поверхности, что облегчает его обслуживание. Схема работы данной машины несколько более сложна, по сравнению с сухим ротором аналогичной машины, однако маслозаполненные винтовые компрессоры имеют более высокую степень сжатия и увеличенный ресурс работы. Накопительная энергоустановка представляет собой баллон-ресивер. Габаритные размеры ресивера определяются первичными расчетами по предполагаемым к выполнению

технологическим процессам и в дальнейшем приводятся к ближайшему стандартному большему. Потребление энергии сжатого воздуха происходит по трем основным направлениям. Первое – это уличный пневмоинструмент. Для работы данной системы должна быть смонтирована разветвленная система пневмотрубопроводов и подачу сжатого воздуха в систему необходимо осуществлять через входной пневморедуктор, который будет регулировать рабочее давление в системе. Вторым потребителем является жилой дом, и здесь есть два способа прокладки системы пневмопроводов. Скрытая – выполняется при первичном строительстве или капитальном ремонте, и наружная – если в здании отделочные работы проводить не собираются. При монтаже этого участка системы также необходимо устанавливать пневморедуктор, который будет регулировать давление в ней. И третья ветка трубопровода может быть использована для поднятия воды из скважины, за счет работы эрлифтной установки. Разводка точек потребления внутри жилых и технических зданий производится при помощи пневмотрубопроводов выполненных из полиэтилена низкого давления, эти системы широко применяются в настоящее время для подключения точек горячего и холодного водоснабжения.

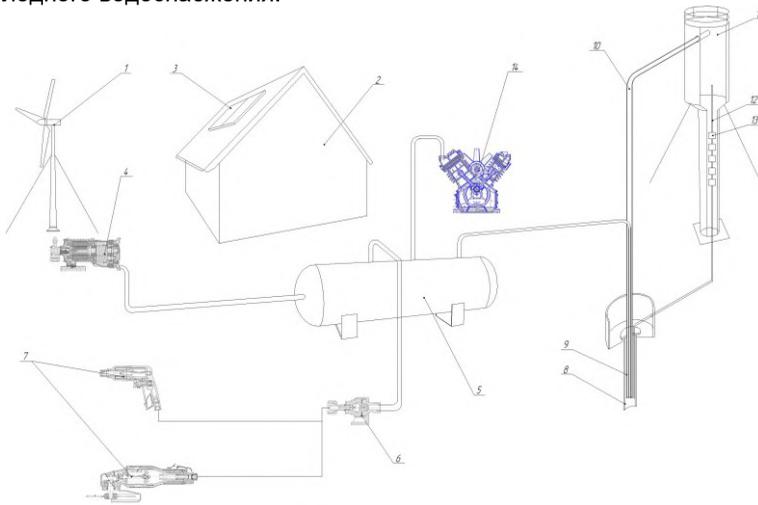


Рис. 1. Принципиальная схема системы жизнеобеспечения удаленных потребителей:

1- ветрогенератор; 2 – жилой комплекс; 3 – солнечная панель; 4- винтовой компрессор; 5 - баллон- ресивер; 6 – пневмораспределитель; 7 – пневмоинструменты; 8 – скважина водоснабжения; 9 – обсадная труба водоснабжения; 10-водяная эмульсия; 11- башня водоснабжения; 12-трубопровод для перетока воды; 13- мини ГЭС; 14 – поршневой (резервный) компрессор, работающий от солнечных панелей

Схема водоснабжения работает следующим образом. В обсадную трубу скважины вместо электрического насоса устанавливают две трубки. Через одну из них нагнетают сжатый воздух, а через вторую азрированная вода поднимается вверх, к приемному резервуару накопителю. Если у потребителя возникают перебои в электроснабжении, прерывается подача сгенерированной электроэнергии, то открывается сливной клапан, через который вода самотеком начинает перетекать из верхнего резервуара через гидрогенератор в скважину. Появляется круг циркуляции воды через мини-ГЭС. Таким образом, потребитель получает дополнительную маневренную мощность, которой хватит еще на несколько минут для завершения технологического цикла. Продолжительность использования этой энергии напрямую зависит от объемов резервуаров. Но основное назначение системы – водоснабжение потребителя. То есть, если все энергоисточники неработоспособны, у потребителя запасена питьевая вода, поднятая на высоту 10 метров и поступающая к нему самотеком, без потребления электроэнергии. Для повышения надежности системы предлагается на крышу жилого здания установить электрические солнечные батареи, от которых выработанная электрическая энергия будет уходить на привод поршневого электрического компрессора, который также, как и первый будет заполнять баллон-ресивер, но источником энергии в этот раз будет уже энергия солнца, а не ветер.

Подключение к центральной системе в этом случае только приветствуется, но используется как резервный источник энергоснабжения. А вся система освещения помещений и окружающей территории выполняется не на 220 В, а на 12 В. И используются при этом преимущественно светодиодные светильники, как более яркие и менее подверженные перегоранию.

Для ее эффективной реализации проекта предлагается перевести большую часть находящегося в эксплуатации энергооборудования (дрели, шуруповерты, компрессоры и т. д.) с электрического привода на пневмопривод. Благо достижения как отечественных, так и зарубежных производителей данной техники позволяют нам это сделать безболезненно по отношению к циклам выполняемых технологических операций. То есть у нас не происходит увеличения времени, затраченного на выполнение того или иного вида работы. Фактически конечному потребителю все равно, что приводит во вращение его инструменты, например – дрель, сила электромагнитного поля статора относительно ротора или сила давления предварительно сжатого воздуха. Потребителя интересует равенство крутящего момента вращающегося инструмента, а они тождественны. При этом следует учесть, что практически всегда при охлаждении системы в период эксплуатации при низких температурах окружающего воздуха возникает потеря давления рабочей среды, но это легко может быть ком-

пенсировано дополнительным отбором воздуха из окружающей среды.

Применение данной системы позволит уйти от необходимости в накоплении электрической энергии в аккумуляторных батареях, как это сейчас делают, при этом соблюдается выполняемость процессов без потери технологичности.

Литература

1. Тригенерация, как способ для получения энергетических носителей/ В.Ю. Соколов, Е.В. Фирсова // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры". Материалы Всероссийской научно-методической конференции: тез. докл.; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ООО ИПК "Университет", 2012. – с. 299–302.

УДК 621.577.42

В.Н. ТОКУНОВ, студент
А.В. БАННИКОВ, к.т.н. доцент
С.В. ВАСИЛЬЕВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: tokunov95@gmail.com¹. avbannikov@rambler.ru.² vasilyev.pte@mail.ru.³

Оптимизация работы водогрейной котельной

Аннотация: рассмотрен метод оптимизации работы водогрейной котельной, составлен вычислительный алгоритм.

Ключевые слова: оптимизация работы, водогрейная котельная, энергосбережение.

V.N.TOKUNOV, student,
A.V. BANNIKOV, candidate of science, senior lecturer,
S.V. VASILIEV, candidate of engineering science, senior lecturer

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: tokunov95@gmail.com¹. avbannikov@rambler.ru.² vasilyev.pte@mail.ru.³

Optimization of the water-heating boiler-house operation

Abstract: a method for optimizing of the water-heating boiler-house operation is considered, and a computational algorithm is compiled.

Key words: optimization of work, water-heating boiler-house, energy saving.

Одним из направлений повышения эффективности работы водогрейных котельных является оптимизация работы основного оборудования т.е. котлов.

При оптимальном распределении тепловых нагрузок между работающими котлами, получаем минимальное значение суммарного расхода топлива $B = B_1 + B_2 = \min$, при этом КПД каждого котла должен быть близок к максимуму. Условием минимального расхода топлива является задача выбора числа и такого распределение нагрузок, при котором первые производные расхода по нагрузке, для любого количества котлоагрегатов равны между собой, т.е. вариант распределения суммарной нагрузки, обеспечивающий наибольшую экономичность работы котельной.

Минимальное значение суммарного расхода топлива котельной находим, приравняв первую производную суммарного расхода к нулю при постоянной тепловой нагрузке Q [1,3].

$$\frac{d(B_1 + B_2)}{dQ_1} = \frac{dB_1}{dQ_1} + \frac{dB_2}{dQ_1} = \frac{dB_1}{dQ_1} + \frac{dB_2}{dQ_1} \cdot \frac{dQ_2}{dQ_2} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{dB_1}{dQ_1} + \frac{dB_2}{dQ_2} \cdot \frac{dQ_2}{dQ_1} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{dQ_2}{dQ_1} = \frac{d(Q - Q_1)}{dQ_1} = \frac{dQ}{dQ_1} - \frac{dQ_1}{dQ_1} = -1, \quad (3)$$

$$\frac{dQ}{dQ_1} = 0, \quad \frac{dQ_1}{dQ_1} = 1,$$

Отсюда

$$\frac{dB_1}{dQ_1} - \frac{dB_2}{dQ_2} = 0$$

$$\frac{dB_1}{dQ_1} = \frac{dB_2}{dQ_2};$$

$$r_1 = r_2 = \dots = r_n. \quad (4)$$

Геометрический смысл уравнения (4) заключается в том, что углы наклона касательных к кривым соответствуют: $B_1 = f(D_1)$, $B_2 = f(D_2)$.

С помощью офисного пакета MS Excel, составлен вычислительный алгоритм, целью которого является нахождение оптимальных нагрузок конкретных водогрейных котлов, определению КПД брутто котла η_i и его изменение $d\eta_i/dQ_i$, различными методами.

Первый метод был основан на аппроксимации функции $\eta_i = f(Q_i)$, второй на результатах анализа полуэмпирической формулы Я.П. Пекера, по расчету балансовых потерь с уходящими газами. Результаты исследований выполненных в работе [3] показали, что в случае оптимизации котельной с тремя-пятью и более котлами 2-й способ аналитического

решения задачи значительно усложняется, так как приводит к уравнениям 3–5-й степени относительно аргумента соответственно.

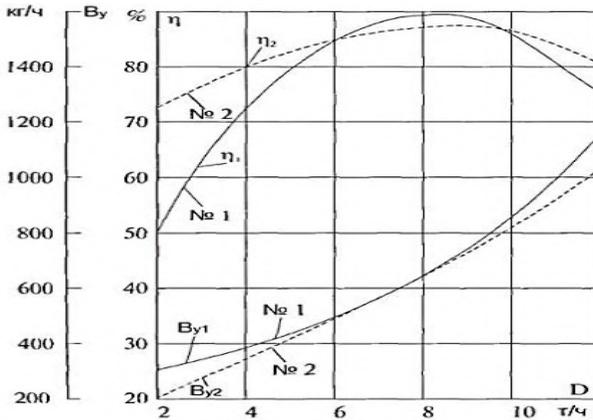


Рис. 1. Зависимость КПД и расхода условного топлива от нагрузки котла [1].

В качестве примера, для расчета авторами были использованы данные, полученные из режимных карт при испытании двух котлов одной из котельных АО «Ивгортеплоэнерго», проведена аппроксимация графиков зависимости КПД от нагрузки одним из методов в программе MS Excel, для оптимизации работы котлов в программе использовалась надстройка ПОИСК РЕШЕНИЯ при определенных граничных условиях.

Наиболее эффективным методом оптимизации нагрузок в котельной, работающей и в базовом, и в пиковом режимах, следует считать применение программных средств по тепловым расчетам котлов.

Рассмотренный алгоритм может быть заложен в контроллер, управляющий работой котельной с любой мощностью котлов. Это позволит сэкономить значительно количество топлива без дополнительных капитальных вложений. Реализацию такого метода оптимизации тепловых нагрузок в котельной следует рассматривать как важное мероприятие по вопросам решения проблем энергосбережения, повышению технического уровня эксплуатации энергоисточников и системы теплоснабжения в целом.

Литература

1. Коршунова Л.А., Кузьмина Н.Г. Управление энергетическим производством: учебное пособие. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 175 с. 2., ил.
2. Астахов Н.Л. Инструкция по составлению технического отчета о тепловой экономичности работы электростанции: – М.: СЦНТИ, 1971.
3. Байрашевский Б.А. Оптимизация режима работы водогрейной котельной. – 1989. – № 5.

УДК 004.942

С.Н. ЯРУНИН, к.т.н, доцент,
Н.Н. ЯРУНИНА, к.т.н.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: yarunin-sn@yandex.ru

Экономия энергоресурсов в магистральном транспорте природного газа с помощью программно-информационного комплекса «ОптиГаз»

Аннотация: В статье, с целью устранения приведенных недостатков фактических режимов газотранспортной системы, предлагается применение комплексного системного подхода, основанного на объединении разработанных локальных моделей элементов системы в единую математическую модель. Для практического применения разработан программно-информационный комплекс и показана эффективность его применения.

Ключевые слова: газотранспортная система, компрессорная станция, установка охлаждения газа, магистральный газопровод, газоперекачивающие агрегаты.

S.N. YARUNIN, Candidate of Engineering, docent,
N.N. YARUNINA, Candidate of Engineering

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: yarunin-sn@yandex.ru

Energy savings in the main pipeline transport of natural gas using the program-informational complex "OptiGas"

Abstract. In the article, in order to eliminate the resulted drawbacks of the actual modes of the gas transportation system, it is proposed to apply an integrated system approach based on combining the developed local models of the system elements into a unified mathematical model. For practical use, a software and information complex has been developed and its effectiveness is shown.

Key words: gas transportation system, compressor station, gas cooling unit, main gas pipeline, gas-pumping units.

Газотранспортная система (ГТС) состоит из линейной части газопровода и компрессорных станций (КС) и предназначена для транспортировки газа из района добычи или производства в район его потребления.

Компрессорные станции газопроводов оборудуют центробежными компрессорами с приводом от газовых турбин или электродвигателей.

Опыт эксплуатации компрессорных станций магистральных газопроводов показывает, что в условиях переменного режима работы ГТС и неравномерности подачи газа в течение года газоперекачивающие

агрегаты (ГПА) в ряде случаев, работают в неоптимальных режимах.

Существующая система выбора режима работы оборудования зачастую руководствуется только обеспечением необходимой производительности и не учитывает затраты энергоресурсов.

В ходе энергетического обследования выявлены следующие недостатки режима работы ГТС:

1. Регулирование производительности на электроприводных КС происходит в основном путем включения или выключения дополнительного электроприводного ГПА, что сопровождается большим пусковым током и высоким крутящим моментом. Этот вредно воздействует не только на сам электродвигатель, но также на механизмы приводной машины, сокращая срок службы агрегатов. По этой причине на практике при больших колебаниях объема перекачиваемого газа, часто персонал цеха оставляет в работе большее количество электроприводных ГПА, чем требуется. Следовательно, имеет место большой перерасход электроэнергии на привод нагнетателя (порядка $3 \div 7$ %).

2. Часто наблюдается ситуация, когда из-за снижения производительности режим работающих нагнетателей приближается к границе помпажа. В этом случае для увеличения расхода газа через компрессорную машину ее переводят на режим работы «магистраль + станционное кольцо». Часть газа неоднократно перекачивается по внутристанционному кольцу, при этом нерационально расходуется большое количество электрической энергии. По экспертной оценке из-за неоптимальных режимов работы электроприводных ГПА перерасход электроэнергии на компримирование составляет $5 \div 10$ %.

3. Температура технологического газа после установок охлаждения газа (АВОГ) выбирается и поддерживается без учёта экономических и энергетических факторов.

4. Большинство ГПА с газотурбинным приводом постоянно работают с недогрузкой по мощности. Отклонение от номинального режима составляет $15 \div 20$ %. Это является причиной снижения КПД газовой турбины и соответствующего перерасхода топливного газа. По экспертной оценке, перерасход газа на компримирование составляет $5 \div 15$ %.

5. Некоторые существующие схемы подключения КС и нагнетателей к магистральным газопроводам являются недостаточно гибкими и ограничивают выбор режима работы ГПА.

Указанные недостатки позволяют сделать вывод, что газотранспортная система работает в неоптимальном режиме. Повышение эффективности возможно за счет оптимизации режимов работы отдельных её элементов (газопровода, ГПА, АВОГ и т.д.), объединенных в единую систему.

С этой целью на кафедре Промышленной теплоэнергетики ИГЭУ авторами статьи был разработан программно-информационный комплекс «ОптиГаз». Этот продукт предназначен для расчета и оптимизации работы ГТС по критерию оптимальности - минимум затрат топлив-

но-энергетических ресурсов на транспорт газа.

«ОптиГаз» адаптируется к небольшому участку ГТС, состоящему из трех – четырех КС, расположенных на одном газопроводе и позволяет решать следующие задачи:

- ✓ Выбрать оптимальное количество работающих ГПА на каждой станции в каждом цехе;
- ✓ Определить загрузку каждого газоперекачивающего агрегата с учётом возможного способа регулирования (изменение частоты вращения, байпасирование, дросселирование);
- ✓ Определить оптимальные параметры газа на выходе с каждой компрессорной станции (давление, температура);
- ✓ Задать оптимальный режим работы АВОГ;
- ✓ Выбрать оптимальную схему подключения КС и КЦ к ниткам магистральных газопроводов;
- ✓ Выбрать схему подключения нагнетателей (параллельно или последовательно).

Интерфейс программно-информационного комплекса «ОптиГаз» представлен на рис. 1.

Рассмотрим пример применения программно-информационного комплекса «ОптиГаз» для перераспределения загрузки между двумя компрессорными станциями с газотурбинными ГПА (рис.2).

Расчет показал, что экономия топливного газа достигается за счет вывода из работы одного агрегата и более полной загрузки оставшихся в работе агрегатов. Это составляет 4-5% от общего потребления топливного газа на этих двух станциях.

Рассмотрим ещё один пример применения программно-информационного комплекса «ОптиГаз», позволяющей получить экономию топливного газа за счёт выбора оптимальной схемы включения нагнетателей (рис. 2).

По существующей схеме четыре газотурбинных ГПА работают в парах при последовательном включении. При этом обеспечивается повышение давления с 42,7 до 53,6 кгс/см².

Те же самые параметры можно обеспечить при параллельном включении трёх нагнетателей. Полезная мощность на валу каждого двигателя увеличивается на 32 % с 4470 до 5900 кВт, а эффективный КПД при этом возрастает с 25,7 до 29,0 % (в 1,13 раза). Экономия топливного газа при переходе на параллельную схему включения составляет 53 тыс.нм³/сут или 18 %.

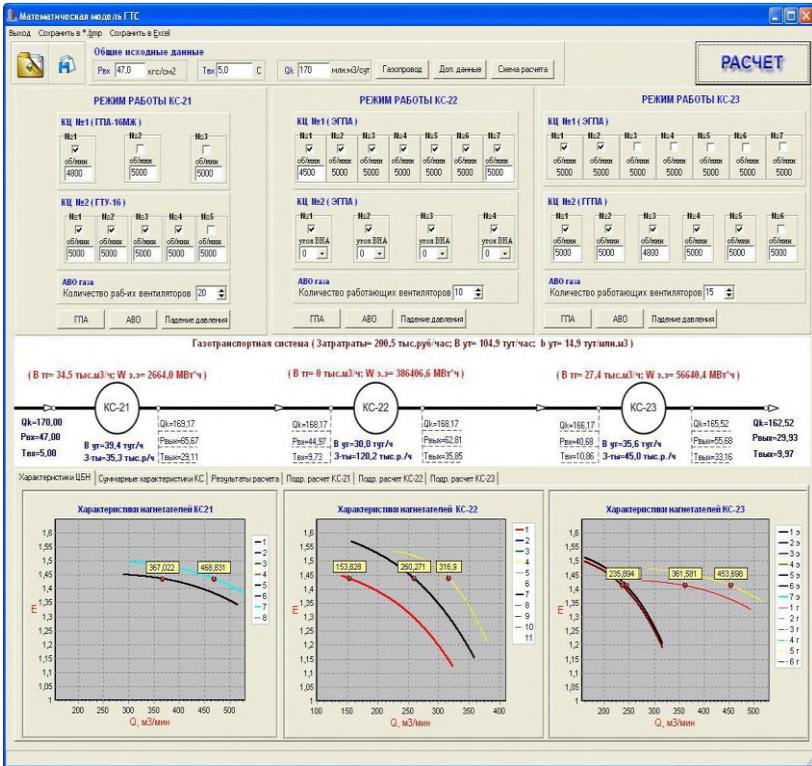


Рис.1. Программно-информационный комплекс «ОптиГаз»

Наконец рассмотрим пример применения программно-информационного комплекса «ОптиГаз» для экономии электроэнергии при выборе оптимальной температуры газа после АВОГ. Расчёты показали, что при понижении температуры газа на выходе из АВОГ на 10°C с 40 до 30°C пропускная способность газопровода увеличивается на 5 %, а мощность электропривода или расход топливного газа снижается на 3 %.

Выше перечислены только несколько конкретных примеров экономии энергоресурсов при эксплуатации комплекса «ОптиГаз». В реальной ситуации способов получить экономию, изменив режим работы КС, гораздо больше. Но найти оптимальные сочетания параметров и режимов работы можно, лишь используя методологию системного анализа, рассмотрев всю газотранспортную систему как единое целое, а отдельные её элементы - во взаимосвязи.

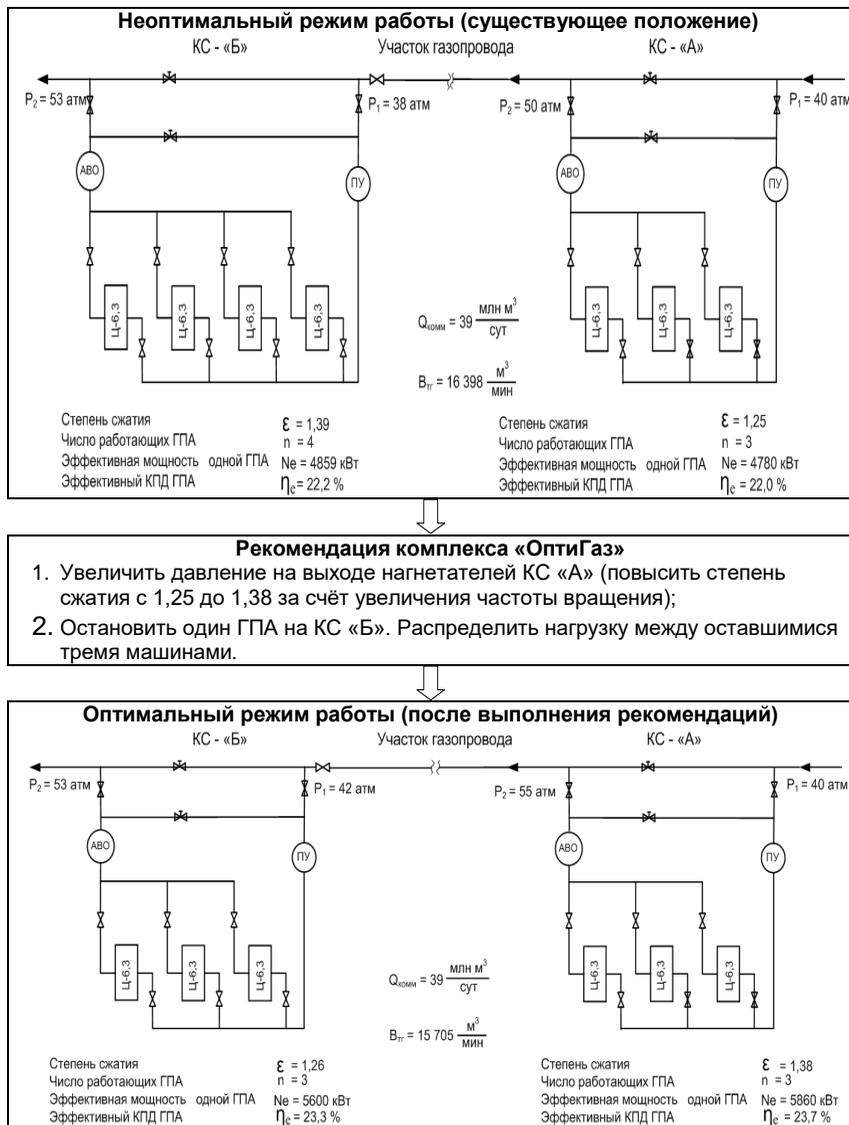


Рис. 2. Пример использования программно-информационного комплекса «ОптиГаз» для оптимального распределения загрузки между КС

Литература

1. **Завальный П.Н., Ревзин Б.С.** Повышение эффективности использования центробежных нагнетателей ГПА в газотранспортных системах. Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 105 с.
2. **Козаченко А.Н.** Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов. М: Нефть и газ, 1999. – 463 с.
3. **Эксплуатация** магистральных газопроводов: Учебное пособие. /Под общей редакцией Ю.Д. Земенкова. – Тюмень: Изд. «Вектор Бук», 2002 – 528 с.
4. **Антонова Е.О., Г.В. Бахмат, И.А. Иванов, О.А. Степанов** Теплообмен при трубопроводном транспорте нефти и газа: – Санкт-Петербург: Издательство Недра, 1999. – 228 с.

АВТОРСКИЙ ИНДЕКС

А

АВДЮНИН Е.Г. 315, 317
 АКСАКОВСКАЯ Л.Н. 306, 308
 АКСЕНЧИК К.В. 210, 217
 АНГЕЛОВ В.И. 366
 АНДРЕЕВ С.В. 317
 АРБАТСКИЙ А.А. 187, 320
 АРОНСОН К.Э. 54, 178
 АРТЕМЬЕВА В.А. 234, 246
 АРТЕМЬЕВА В.А.

Б

БАЛАГУРОВ И.А. 279
 БАЛАШОВА Н.В. 137
 БАННИКОВ А.В. 341, 375
 БАННИКОВА С.А. 326
 БАРОЧКИН А.Е. 41, 44, 294
 БАРОЧКИН Е.В. 47
 БАРОЧКИН Ю.Е. 47
 БЛИНОВ О.В. 228
 БРЕЗГИН Д.В. 178
 БУДАЕВА А.Ю. 141, 144
 БУДАНОВ В.А. 44
 БУЗОВЕРОВ Е.А. 330
 БУХМИРОВ В.В. 237, 268, 271
 274
 БУШУЕВ Е.Н. 137, 141, 144
 БУШУЕВА Н.В. 134

В

ВАСИЛЬЕВ С.В. 341, 375
 ВЕРЕТЕННИКОВ С.В. 152, 155
 ВИЛЕСОВ Р.А. 30
 ВОЛЬМАН М.А. 100
 ВОРОШИЛОВ О.А. 81

Г

ГАБДРАХМАНОВ Э.А. 194
 ГАБИТОВ Р.Н. 234, 246, 255
 ГАЛАТА Д.А. 91
 ГАСЬКОВ А.К. 268
 ГЛАЗОВ В.С. 187, 194, 199,
 320
 ГОЛУБЕВ А.В. 34, 37
 ГОРБУНОВ В.А. 84, 87, 91
 258, 261
 ГОРЕЛОВ М.В. 197
 ГОРИНОВ О.И. 240, 243
 ГОРИНОВ О.И.
 ГОРОЖАНИН М.А. 333

ГОРШЕНИН С.Д. 44, 81
 ГРЕБНЕВА Н.В. 166, 169, 172
 ГРИЦЕНКО М.А. 297
 ГРУЗДЕВ С.В. 97
 ГУРЬЯНОВ А.И. 159
 ГУСАРОВ А.В. 119
 ГУСЕВ Е.В. 210

Д

ДМИТРИЕВ А.М. 106
 ДМИТРИЕВ М.В. 106
 ДОЛИНИН Д.А. 243, 249, 252
 ДУДКО В.А. 166, 169

Е

ЕВДОКИМОВ О.А. 152
 ЕЛИН Н.Н. 311
 ЕЛФИМОВ Н.А. 208
 ЕРЕМИНА Н.А. 122

Ж

ЖЕЛОНКИН Н.В. 54, 178
 ЖУКОВ В.П. 47, 291, 294

З

ЗАЙНУЛЛИН Л.А. 175
 ЗАКОЖУРНИКОВ С.С. 208
 ЗАКОЖУРНИКОВА Г.С. 208
 ЗАПОЛЬСКАЯ Е.М. 162
 ЗАХАРОВ В.М. 326, 338, 366
 ЗИМИН А.П. 44
 ЗИНОВЬЕВ Б.С. 304, 306, 308
 ЗОМАРЕВ Д.О. 14
 ЗОРИН М.Ю. 60

И

ИВАНКОВА М.А. 20
 ИЛЬЧЕНКО А.Г. 94, 97
 ИСАЕВ М.В. 330
 ИСМАИЛОВ Р.М. 243

К

КАЛГАНОВ Д.В. 175
 КАЛГАНОВ М.В. 175
 КАМЕЛО А. 282, 285
 КАРПЫЧЕВ Е.А. 125
 КАСАТКИН К.А. 63
 КИРДЯШКИН А.В. 199
 КИРЕЕВ А.Ю. 181

КИСЕЛЕВ Е.В.	166, 172	МУРМАНСКИЙ И.Б.	54, 178
КИСЕЛЕВ Е.В.		МХОЯН А.А.	199
КЛЕЙМЕНОВА П.С.	197		
КЛЮШКИН А.А.	66, 69	Н	
КОЗЛОВА Е.Д.	27	НАГОРНАЯ О.Ю.	258
КОЗЛОВА М.В.	341	НАГОРНОВА Т.А.	148
КОЛИБАБА О.Б.	234, 240	НАУМОВ С.А.	347, 371
	246, 252	НЕВЕРОВ И.В.	315
	255, 261	НЕФЕДОВ А.С.	57
КОЛОСОВА Ю.С.	112	НИКИФОРОВ А.А.	10
КОЛЬЧУГИНА Ю.Ю.	224	НИКИФОРОВ И.А.	224
КОНДРАШИН А.В.	112, 115	НИКИШОВ В.Ф.	265
КОНОВАЛОВ А.В.	333, 358	НИКОНОРОВ А.Н.	17, 27, 30
КОНОНОВА В.В.	159		
КОРОЛЕВА М.П.	304	О	
КОРОЧКИНА Е.Е.	228	ОВЧИННИКОВ Л.Н.	285
КРУГЛОВА В.А.	197	ОГУРЦОВ А.В.	297
КУДРЯШОВ И.С.	14	ОГУРЦОВ В.А.	297
КУЗНЕЦОВ А.Г.	17, 30	ОКАТОВ И.М.	317
КУЗНЕЦОВ Г.В.	148	ОНОХИН Д.А.	203
КУРИЛЕНКО Н.И.	148	ОРЛОВ Г.Г.	60, 63, 66, 69
		ОСИПОВ Д.А.	291
Л			
ЛАВРОВ В.В.	166, 172	П	
ЛАПАТЕЕВ Д.А.	338	ПАВЛОВ А.А.	258
ЛАРИН А.Б.	128	ПАВЛОВА М.Ф.	10
ЛАРИН Б.М.	131	ПАРФЕНОВ Г.И.	366
ЛЕДУХОВСКИЙ Г.В.	44, 47, 51	ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ Г.А.	261
ЛЕЗНОВА Н.Р.	294	ПИВНЕВА Е.А.	351
ЛИСОВА Я.В.	23	ПИРАЛИШВИЛИ Ш.А.	152, 155
ЛОНШАКОВ Н.А.	84	ПЛЕТНИКОВА Ю.С.	271
ЛОШКАРЕВ Н.Б.	166, 172	ПОПОВ С.К.	181, 184
ЛУКИН С.В.	221	ПОПОВ С.К.	
		ПОТАПОВА О.И.	184
М		ПОТЕХИН А.Е.	261
МАГОМЕДСАЙГИТОВ Д.М.	41	ПРОРОКОВА М.В.	237
МАЗЛОВ А.А.	208	ПЫЖОВ В.К.	358, 366
МАКАРЫЧЕВ А.Ф.	311	Р	
МАКСИМОВ В.И.	148	РАБОТАЕВ В.Г.	103
МАЛИНИН Н.А.	265	РАДЬКОВА О.В.	10
МАЛЫШЕВ Е.В.	338	РАКИТИН А.С.	214
МАМЕДОВ Ф.Г.	344	РАКУТИНА Д.В.	274
МАТЮХИН В.И.	169	РЯБИКОВ И.А.	37
МАХОВ О.Н.	330	РЯБЧИКОВ А.Ю.	178
МЕЧТАЕВА М.Н.	87		
МИЗОНОВ В.Е.	279	С	
МИТРОФАНОВ А.В.	282, 285	САБУРОВ Э.Н.	203
МИТРОФАНОВ С.В.	363	САДЧИКОВ А.В.	363
МИХЕЕВ Г.Г.	81	САЛИН А.Г.	14
МИШУРОВ Н.А.	41	САМЫШИНА О.В.	240
МУРАВЬЕВ И.К.	3	СВИСТУНОВ И.Н.	181
МУРАТОВА Т.В.	255	СЕДОВА А.К.	134

СЕМЕНОВ А.С. 252
 СЕМЕНОВ В.К. 100
 СЕННИКОВ В.В. 315, 317, 333
 СИРОТИН Р.В. 338
 СКВОРЦОВ И.А. 240
 СКУРИХИНА А.Д. 69
 СМЕКАЛОВ С.Д. 34
 СМИРНОВ Н.Н. 338, 358, 366
 СОЗИНОВ А.В. 224
 СОЗИНОВ В.П. 369
 СОЗИНОВА Т.Е. 224
 СОКОЛОВ В.Ю. 347, 351, 371
 СОКОЛЬСКИЙ А.И. 210, 265
 СОЛОВЬЕВ И.М. 94
 СОЛОВЬЕВ М.М. 75
 СОРОКИНА А.А. 128
 СПИРИН Н.А. 175
 СТЕПИН И.А. 6, 10
 СТОГОВ П.А. 184
 СУВОРОВ И.А. 228

Т

ТВЕРСКОЙ Ю.С. 3, 20, 23
 ТЕМЛЯНЦЕВ М.В. 162
 ТЕТЕРЕВКОВ И.В. 109
 ТОКУНОВ В.Н. 375
 ТОМИН Н.Г. 300
 ТОМИНА И.В. 300

У

УГРЮМОВ А.Д. 41
 УХАЛОВА Е.Г. 131

Ф

ФАРАХОВ М.М. 231
 ФАРАХОВ Т.М. 231
 ФЕОКТИСТОВ А.В. 162

Х

ХВОСТОВ А.Д. 78

Ц

ЦЕЛИЩЕВ Е.С. 14

Ч

ЧАПЛИН А.Г. 6, 10
 ЧЕРЕМИСКИНА Н.А. 166, 172
 ЧЕРНОВ И.Д. 330
 ЧУХИН И.М. 72

Ш

ШЕЛЫГИН Б.Л. 75, 78
 ШЕРБАКОВ М.С. 317
 ШЕСТАКОВ Н.И. 217, 221
 ШУВАЛОВ С.И. 81
 ШУВЬЕ Е.С. 249
 ШУИНА Е.А. 288

Щ

ЩЕРБАКОВ М.С. 333

Ю

ЮРКИНА М.Ю. 344

Я

ЯРУНИН С.Н. 378
 ЯРУНИНА Н.Н. 378

BERTHIAUX H. 279
 GATUMEL C., 279
 OTWINOWSKI H. 291
 TANNOUS K. 282
 URBANIAK D. 291

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 4. "СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ"	3
Секция 6. "ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ"	41
Подсекция "Тепловые и атомные электрические станции"	41
Подсекция "Технология воды и топлива на тепловых и атомных электрических станциях "	122
Секция 9. "ТЕПЛООБМЕН В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ"	148
Секция 12. "МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ"	279
Секция 17. "ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА"	315

МАТЕРИАЛЫ

Международной научно-технической конференции
**«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»**

(XIX Бенардосовские чтения)

посвящена 175-летию со дня рождения Н.Н.

Бенардоса

Печатаются в авторской редакции

II том

Теплоэнергетика

Подписано в печать 27.04.2017. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ. л. 22,55. Уч.-изд. л. 23,50. Тираж 30 экз. Заказ .
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический
университет имени В.И. Ленина»
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Типография ООО «ПресСто»
153025, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39