

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

при поддержке
Российского фонда фундаментальных исследований
(проект №15-08-20353-г)

МАТЕРИАЛЫ

Международной научно-технической конференции

«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ»

(XVIII Бенардосовские чтения)

27-29 мая

II том
Теплоэнергетика

Иваново 2015

В II томе материалов конференции представлены статьи, отражающие результаты научных исследований в области тепловых и атомных электрических станций; промышленная теплоэнергетика; теплообмен в промышленных установках; 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;
Казаков Ю.Б., зав каф. ЭМ, д.т.н., профессор;
Полетаев В.А., зав. каф. ТМС, д.т.н., профессор;
Воробьев В.Ф., зав. каф. ВЭТФ, к.т.н., доцент;
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 «ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

Подсекция «ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ»

УДК 621.311.22

А.П. ЗИМИН, асп., Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, к.т.н., доцент,
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор,
Е.В. БАРОЧКИН, д.т.н., профессор

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

О влиянии метода сведения материальных балансов по данным первичного учета на достоверность фактических значений показателей тепловой экономичности ТЭС

Аннотация. Показана качественная и количественная взаимосвязь между значениями показателей тепловой экономичности ТЭС, определяемыми по данным первичного учета, и способом сведения материальных балансов по тепловой схеме и её отдельным участкам.

Ключевые слова: материальный баланс, тепловая экономичность ТЭС, решение некорректных задач.

A.P. ZIMIN, postgraduate student,
G.V. LEDUKHOVSKY Candidate of Engineering, doцент
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*

The influence of method for determining material balances according to primary accounting on the reliability of actual values of thermal efficiency of heat power plant

Abstract. The authors have shown qualitative and quantitative interrelation between the values of thermal efficiency indicators of heat power station, determined according to primary accounting, and the method of determining the material balances for heat scheme and its separate parts.

Key words: material balance, thermal efficiency of heat power plants, solution of incorrect tasks.

Действующие руководящие документы энергетической отрасли [1, 2] устанавливают порядок расчета фактических и нормативных показателей тепловой экономичности ТЭС. К таким показателям, прежде всего, относятся удельные расходы условного топлива, а также составляющие резерва тепловой экономичности – РТЭ, выраженные количеством перерасходованного и сэкономленного за период условного топлива. Сведение материальных балансов по данным первичного учета для отдельных единиц и групп оборудования ТЭС является обязательным этапом и должно предшествовать расчету показателей тепловой экономичности. Однако руководящими документами не регламентирована методика сведения материальных балансов.

Невязка баланса может быть обусловлена не только метрологическим несовершенством приборов учета, но и их неисправностью или даже временным отсутствием. Система балансовых уравнений, составленных для некоторой технологической схемы (участка тепловой схемы ТЭС), чаще недоопределена, что предопределяет возможность получения наиболее вероятного, но не точного решения.

Наиболее существенные недостатки руководящих документов [1, 2] в части требований по обеспечению качества измерения основных параметров, участвующих в расчете показателей тепловой экономичности, состоят в следующем:

1) предписывается выполнение контроля сходимости материального баланса только по одному наиболее технологически значимому контуру (в частности, от расходомеров питательной воды котлов до расходомеров свежего пара турбоагрегатов) без учета балансов по прочим участкам тепловой схемы ТЭС;

2) задается заранее завышенная максимально допустимая величина небаланса, не учитывающая различной степени достоверности определения исходных значений каждого параметра в конкретных случаях;

3) сведение материальных балансов осуществляется без согласования с энергетическими балансами, что не позволяет оценить качество измерения давления и температуры потоков теплоносителей.

На практике наличие указанных недостатков приводит к существенным ошибкам при расчете показателей тепловой экономичности. Например, для условий Омской ТЭЦ-4 увеличение невязки материального баланса схемы главных паропроводов на 1 % приводит в среднем-зимнем режиме к ошибке в определении перерасхода топлива в условном исчислении около 500 тонн за месяц. Невязка в 1 % материального баланса системы паропроводов собственных нужд давлением 8-13 ата эквивалентна ошибке в определении перерасхода топлива в условном исчислении более 280 тонн за месяц. При существующем подходе к оценке достоверности данных системы технического (первичного) учета указанные затраты могут быть списаны на недостатки эксплуатации

либо плохое техническое состояние оборудования, а отчетные показатели тепловой экономичности ТЭС окажутся искаженными.

С учетом этого ранее нами предложен ряд методов сведения материальных и энергетических балансов в энергетических системах сложной структуры в условиях недостаточности (неопределенности) первичной информации, базирующихся на формулировках задачи регуляризации Тихонова, аналитических и численных методах её решения [3–5]. В рамках настоящей работы устанавливается количественная взаимосвязь между способом сведения материального баланса участка схемы от питательных насосов до паромеров свежего пара турбин конкретной ТЭЦ и конечными показателями тепловой экономичности.

В табл. 1 приведены результаты расчета фактических и номинальных удельных расходов топлива на отпуск тепловой $b_{тэ}$ и электрической $b_э$ энергии и РТЭ за месяц по Омской ТЭЦ-4. В каждом из расчетов использованы значения расходов основных потоков теплоносителя, полученные при сведения материального баланса по данным первичного учета разными способами [5]. Методика расчета удельных расходов топлива и РТЭ соответствует действующим руководящим документам [1, 2] и утвержденной нормативно-технической документации по топливоиспользованию ТЭЦ. В каждом из расчетов в полном объеме выполнены требования документа [1] по сведению прочих балансов: теплового, электрического, топливного.

Таблица 1. Результаты расчета при разных вариантах сведения баланса

Показатель, единица измерения	Значение показателя при разных способах сведения материального баланса					
	Без сведения баланса	Решения задачи регуляризации материальных потоков (без учета ограничений по потокам энергии)			Численные решения задачи совместной регуляризации материальных и энергетических потоков	
		Аналитическое, скалярная постановка	Численное, скалярная постановка	Численное, векторная постановка	Аддитивный интегральный критерий	Мультипликативный интегральный критерий
1. $b_э$, г у.т./кВт·ч:						
– фактический	360,5	360,5	360,5	360,5	360,4	360,5
– нормативный	355,1	357,8	359,8	358,9	357,3	357,4
2. $b_{тэ}$, г у.т./Гкал:						
– фактический	183,4	183,4	183,4	183,4	183,5	183,4
– нормативный	182,4	182,6	183,4	183,1	183,0	183,0
3. РТЭ, т у.т.	1054	610	117	324	570	545

Из данных таблицы видно, что фактические значения удельных расходов топлива практически не зависят от применяемой методики сведения материального баланса, поскольку суммарный расход сожженного топлива, отпуск тепловой и электрической энергии являются данными коммерческого учета, то есть характеризуются высокой степенью достоверности. Но нормативные значения удельных расходов топлива, зависящие от фактических нагрузок каждого агрегата и, следовательно, от способа сведения балансов, изменяются в большей степени. Соответственно, итоговая величина РТЭ отличается для некоторых вариантов сведения балансов практически на порядок. Очевидно, что наиболее представительными следует считать результаты расчетов, полученные при сведении материальных балансов в ходе решения задачи совместной регуляризации материальных и энергетических потоков [5].

Приведенный пример доказывает, что влияние способа сведения материального баланса на значения итоговых показателей тепловой экономичности ТЭС может быть весьма существенным. Ошибка, вызванная некорректным сведением материального баланса или же отсутствием работы по сведению балансов, сопоставима с искомым показателем – резервом тепловой экономичности оборудования. Это необходимо учитывать при разработке метрологического обеспечения реализуемого на ТЭС технологического процесса и выборе метода сведения материальных балансов по данным первичного учета.

Литература

1. **Методические** указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования (РД 34.08.552-95). М.: АО «Фирма ОРГРЭС», утв. Минтопэнерго РФ 24.11.95, введ. в действие с 01.02.96, с изм. № 1 от 15.05.98 г.
2. **Руководящие** указания по сведению месячного пароводяного баланса на тепловых электростанциях (СО 153-34.09.110). М.: ОРГРЭС, утв. «Союзглавэнерго», введ. в действие с 01.01.62 г.
3. **Решение** задачи регуляризации материальных потоков в сложных энергетических системах / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – вып. 2. – С. 5-9.
4. **Векторная** регуляризация материальных потоков в энергетических системах сложной структуры / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – вып. 4. – С. 5-11.
5. **Задача** многокритериальной регуляризации потоков энергии и теплоносителя в энергетических системах сложной структуры / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – вып. 6. – С. 5-10.

Зимин Артем Павлович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@tes.ispu.ru
Ледуховский Григорий Васильевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@tes.ispu.ru
Жуков Владимир Павлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@tes.ispu.ru
Барочкин Евгений Витальевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

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

Методика выбора оптимальных параметров рабочих тел для ПГУ с котлом-утилизатором

Аннотация. Разработана методика оптимизации параметров рабочих тел для парогазовых установок с котлом-утилизатором. В методике учитывается допустимая конечная степень влажности пара на выходе из паровой турбины. Приведены примеры термодинамической оптимизации ПГУ.

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

Methods of selecting the optimal parameters of working bodies for SGP with heat recovery boiler

Abstract. The technique of optimizing the parameters of working bodies for combined-cycle plants with heat utilization. The methodology takes into account the final permissible degree of humidity of the outlet steam from the steam turbine. The examples of thermodynamic optimization of SGP.

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

В парогазовой установке с котлом-утилизатором (ПГУ с КУ) сжигание топлива осуществляется только в камере сгорания газовой турбины, а получение водяного пара в котле-утилизаторе (КУ) осуществляется за счет утилизации теплоты уходящих из ГТУ газов (рис. 1).

Оптимизация параметров рабочих тел такой ПГУ весьма сложная многовариантная задача [1, 2], т.к. параметры рабочих тел газового контура определяют допустимые значения параметров парового контура. В свою очередь при заданной температуре газов перед газовой турбиной T_3

оптимальное значение степени повышения давления воздуха в компрессоре ($v_{\text{оптПГУ}}$) зависит от параметров пара перед ПТУ p_o и T_o .

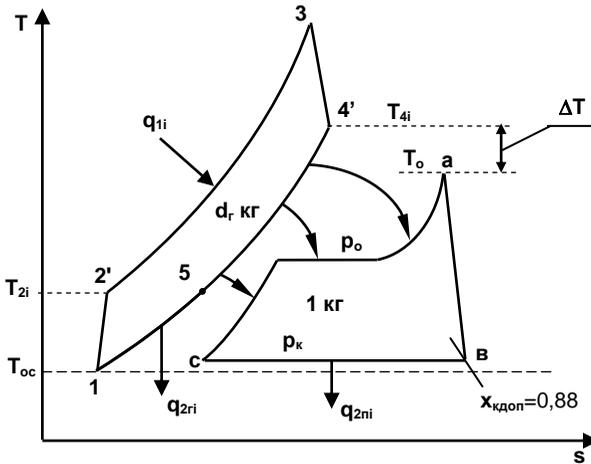


Рис. 1. Цикл ПГУ с КУ в T,s- диаграмме

Особенностью выбора оптимальной степени повышения давления воздуха в компрессоре ($v_{\text{оптПГУ}}$) для ПГУ с КУ по отношению к $v_{\text{опт}}$ автономно работающей ГТУ является то, что кроме анализа КПД и удельной работы цикла ПГУ с КУ при оптимизации величины v необходимо оценивать допустимое значение температуры газов на выходе из газовой турбины T_{4i} , которое должно быть больше температуры пара на входе в паровую турбину T_o . Для этого строится график зависимости $T_{4i}=f(v)$ и определяется область допустимых значений степени повышения давления воздуха в компрессоре для ПГУ с КУ при заданных значениях температур T_3 и T_o (рис. 2).

Что касается выбора оптимальных параметров ПТУ p_o и t_o их всегда целесообразно принимать при сопряженных параметрах, обеспечивающих допустимую степень сухости пара на выходе из паровой турбины $x_{ki}=0,88$, т.е. снижение p_o или увеличение t_o для увеличения $x_{ki}>0,88$ не приведет к увеличению экономичности ПГУ. Данный вывод подтверждают вариантыные расчеты экономичности ПГУ с КУ, приведенные в табл. Эти расчеты выполнялись при $t_1=0$ °С, $t_3=900$ °С и условии, что разница температур уходящих газов из ГТУ и пара на входе в ПТУ не должна быть менее 100 °С.

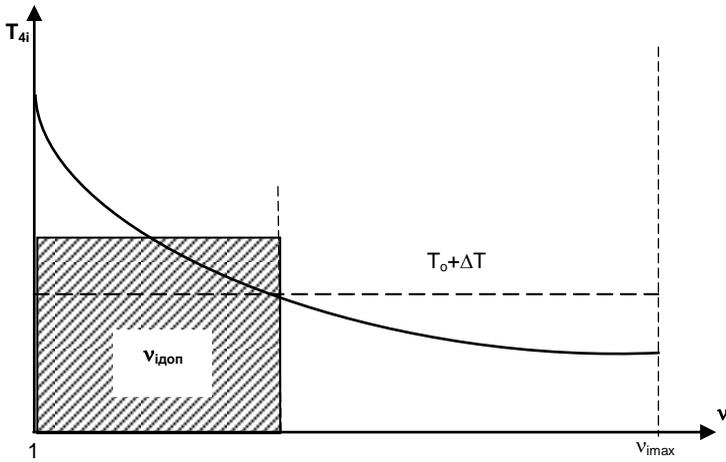


Рис. 2. К определению области допустимых значений степени повышения давления воздуха в компрессоре необратимого цикла ПГУ с КУ

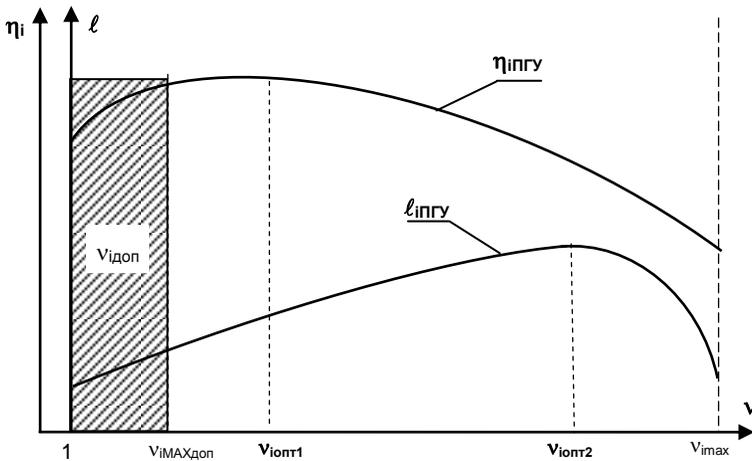


Рис. 3. К анализу влияния степени повышения давления воздуха в компрессоре на тепловую экономичность цикла ПГУ с КУ

Таблица. Результаты оптимизации p_0 и t_0 для ПГУ при $t_1=0$ °С и $t_3=900$ °С

$V_{\text{опт}}$	t_{d1} , °С	p_0 , бар	t_0 , °С	$x_{\text{кп}}$	$\eta_{\text{птту}}$	$\eta_{\text{гту}}$	$l_{\text{пгу}}$, кДж/кг	$\eta_{\text{пгу}}$
11	388,1	8	280	0,882	0,2561	0,3354	3023,548	0,4442
11	388,1	9	290	0,881	0,2618	0,3354	3059,293	0,4466
9	418,8	10	320	0,881	0,2692	0,3240	2938,898	0,4451
10	402,5	9	300	0,887	0,2629	0,3305	2989	0,4452

Обозначения величин, приведенных в таблице:

$V_{\text{опт}}$ – оптимальное значение степени повышения давления воздуха в компрессоре;

$\eta_{\text{птту}}$ – внутренний абсолютный КПД цикла ПТУ;

$\eta_{\text{гту}}$ – внутренний абсолютный КПД цикла ГТУ;

$\eta_{\text{пгу}}$ – внутренний абсолютный КПД цикла ПГУ;

$l_{\text{пгу}}$ – удельная работа ПГУ на кг водяного пара.

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

- оптимальное значение степени повышения давления воздуха в компрессоре для ПГУ с КУ всегда соответствует максимально допустимой ее величине при заданных t_3 , t_0 и $\Delta t=t_4-t_0$;
- выбор оптимальных значений параметров пара перед ПТУ p_0 и t_0 для ПГУ с КУ всегда целесообразно вести при минимально допустимом значении степени сухости пара на выходе из турбины $x_{\text{кп}}=0,88$;
- выбор оптимальных значений параметров рабочих тел ПГУ с КУ необходимо вести при ориентации на максимальные значения КПД и работы цикла ПГУ.

Литература

1. **Чухин И.М.** Техническая термодинамика. Часть 2., учебн. пособие. – ИГЭУ, 2008, 228 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.

Чухин Иван Михайлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: chuhin@tot.ispu.ru

УДК 621.311.22

К.А. АНДРЮШИН, аспирант каф. ТЭС

ФГБОУВПО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"»
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14
E-mail: andryushin.kiril@mail.ru

Анализ влияния температуры наружного воздуха на регулировочный диапазон ПГУ

Аннотация. В результате численного исследования на компьютерном тренажере энергоблока ПГУ-450, выведены зависимости для мощностей верхней и нижней границ регулирования от температуры наружного воздуха. Регулировочный диапазон ПГУ находится в пределах 33–44 % от максимальной нагрузки, что значительно уступает аналогичному показателю конденсационных энергоблоков на газомазутном топливе.

Ключевые слова: ТЭС, парогазовая установка, регулировочный диапазон

K.A. ANDRYUSHIN, graduate

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya, 14
E-mail: andryushin.kiril@mail.ru

Analysis of the impact of the outside air temperature on the adjustment range of CCP

Abstract. The numerical study on a computer simulator CCP-450, derived according to thickness of the upper and lower limits of regulation of the outdoor temperature. Adjusting range CCP is within 33-44% of the maximum load that is considerably inferior to the same index of condensing units for oil-gas fuel.

Key words: Thermal power plants, combined cycle plant, the adjustment range.

Либерализация рынков электроэнергии и мощности, возросшая конкуренция на этом рынке и желание генерирующих компаний получить максимальную маржинальную прибыль от продажи электроэнергии диктуют новые требования к управлению режимами работы тепловых электростанций. Применительно к ТЭЦ данная проблема осложняется тем, что для ТЭЦ существуют два задания - по электрической и по тепловой нагрузкам. Разница между ними состоит в том, что задание по электрической нагрузке заранее известно и прогнозируемо, тогда как задание по отпуску тепловой энергии невозможно точно прогнозировать.

В настоящее время происходит активное внедрение ПГУ на ТЭЦ, поэтому актуальным становится вопрос об оптимальном распределении тепловой и электрических нагрузок между энергоблоками ТЭЦ при наличии в составе ее оборудования ПГУ. ПГУ имеют ряд особенно-

стей, которые необходимо учитывать при оптимальном распределении нагрузки, а именно:

- зависимость величины регулировочного диапазона от температуры наружного воздуха,
- ухудшение экологических и экономических показателей при частичных нагрузках,
- возможность не равномерного распределения нагрузки ГТУ между параллельно работающими в составе ГТУ газовыми турбинами,
- более высокая маневренность ПГУ по сравнению с традиционными тепловыми энергоблоками.

Данная статья посвящена исследованию влияния температуры наружного воздуха на регулировочный диапазон ПГУ на примере ПГУ-450.

Анализ технической литературы показал, что проблемы оптимального управления режимами работы ТЭЦ со сложным составом оборудования и, в частности, оптимального распределения тепловой и электрической нагрузки при заданном составе генерирующего оборудования в режиме оперативного планирования активно обсуждаются [1,2], однако, особенности ПГУ учитываются лишь частично. Так, в [2] поставленная задача решается с учетом ограниченного регулировочного диапазона ПГУ при заданной температуре наружного воздуха.

Электрическая нагрузка ГТУ и отпускаемое блоком тепло зависят от температуры наружного воздуха [3, 4], от выбранного состава и режимов работающего оборудования. Соответственно, изменение температуры наружного воздуха влияет на номинальную нагрузку ПГУ, в основном за счет изменения режима работы компрессора газовой турбины.

С учетом суточных изменений температуры окружающего воздуха, для оптимального распределения тепловой и электрической нагрузки, требуются зависимости изменения максимальной и минимальной мощностей газотурбинной установки (ГТУ) и ПГУ от температуры наружного воздуха.

Очевидные сложности получения этих зависимостей на действующем оборудовании были решены путем проведения исследования на тренажере энергоблока ПГУ-450 производства ЗАО «Тренажеры для электростанций» [5]. В состав основного оборудования ПГУ-450 входят: ГТУ в составе двух газовых турбин (ГТ) типа ГТЭ -160 производства ОАО ЛМЗ с генераторами типа ТЗФГ-160-2МУЗ; два вертикальных двухконтурных барабанных котла-утилизатора (КУ) типа П-116 разработки ОАО «ИК ЗИОМАР», производства ОАО «ЗиО-Подольск»; одна паровая турбоустановка (ПТ) типа Т-125/150-7,3 с генератором типа ТЗФА-160-2УЗ производства ОАО «Силловые машины».

На основании данных, полученных на тренажере при работе ПГУ с полным составом оборудования, выведены следующие зависимости для мощностей верхней ($N_{ПГУ}^{max}$) и нижней ($N_{ПГУ}^{min}$) границ регулировочного диапазона указанного ПГУ от наружной температуры ($t_{нв}$):

- максимальной мощности ПГУ, МВт:

$$N_{\text{ПГУ}}^{\text{max}} = 498,05 - 0,00483 \cdot t_{\text{нв}} - 0,000167 \cdot t_{\text{нв}}^3, \text{ при } -30 < t_{\text{нв}} \leq -5^\circ\text{C}; \quad (1)$$

$$N_{\text{ПГУ}}^{\text{max}} = 494,64 - 1,43 \cdot t_{\text{нв}} - 0,0626 \cdot t_{\text{нв}}^2, \text{ при } -5 < t_{\text{нв}} \leq 30^\circ\text{C}; \quad (2)$$

- мощности нижней границы регулировочного диапазона ПГУ при различных значениях допустимой температуры пара высокого давления ($t_0^{\text{вд}}$) перед ПТ по условию надежной работы последних ступеней цилиндра низкого давления паровой турбины, МВт:

$$N_{\text{ПГУ}}^{\text{min}} = 293,1 - 1,4 \cdot t_{\text{нв}} - 0,00775 \cdot t_{\text{нв}}^2, \text{ при } t_0^{\text{вд}} = 450^\circ\text{C}; \quad (3)$$

$$N_{\text{ПГУ}}^{\text{min}} = 292,0 - 3,227 \cdot t_{\text{нв}}, \text{ при } t_0^{\text{вд}} = 460^\circ\text{C}; \quad (4)$$

$$N_{\text{ПГУ}}^{\text{min}} = 298,2 - 3,198 \cdot t_{\text{нв}}, \text{ при } t_0^{\text{вд}} = 470^\circ\text{C}. \quad (5)$$

На основании этих данных для оценки величины регулировочного диапазона ПГУ-450, как функция от температуры наружного воздуха при $t_0^{\text{вд}} = 460^\circ\text{C}$ получено следующее выражение (см. также рис. 1):

$$\Delta N_{\text{РД}} = \left(\frac{199,4 - 3,113 \cdot t_{\text{нв}} + 0,051 \cdot t_{\text{нв}}^2}{1 - 0,0172 \cdot t_{\text{нв}} + 0,000578 \cdot t_{\text{нв}}^2} \right). \quad (6)$$

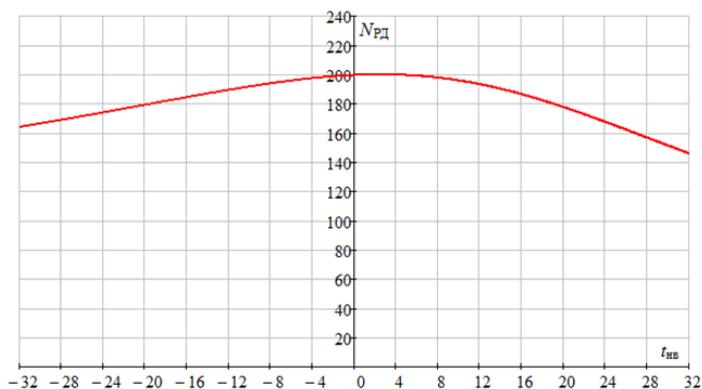


Рис. 1. Зависимость величины регулировочного диапазона ПГУ-450 от температуры наружного воздуха

Анализ полученных зависимостей и графика на рис. 1 показывает:

- расчетная мощность 459,1 МВт ПГУ достигается при температуре наружного воздуха на уровне 15°C ; при снижении температуры воздуха до уровня -5°C она возрастает на 39 МВт и остается примерно на этом уровне при дальнейшем снижении температуры; при росте температуры до уровня 30°C она снижается до уровня 395 МВт. Таким

образом, удельное снижение мощности ПГУ в интервале температур наружного воздуха от -5 до 30°C составляет $2,93 \text{ МВт}/^{\circ}\text{C}$.

- величина регулировочного диапазона ПГУ-450 при изменении температуры наружного воздуха изменяется в достаточно широких пределах (см. рис. 1). Максимальное ее значение достигает $199,8 \text{ МВт}$ при температуре наружного воздуха около $2,5^{\circ}\text{C}$. При снижении температуры наружного воздуха до -30°C регулировочный диапазон уменьшается на $33,5 \text{ МВт}$, а при увеличении до 30°C — на $48,5 \text{ МВт}$.

Таким образом, регулировочный диапазон ПГУ-450 находится в пределах $34-44\%$ от максимальной нагрузки, что значительно уступает аналогичному показателю конденсационных энергоблоков на газомазутном топливе.

Литература

1. **Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Г.А.** Оптимизация режимов электростанций и энергосистем. М.: Энергоатомиздат, 1990.
2. **Болонов В.О., Аракелян Э.К.** Оптимальное управление режимами работы оборудования ТЭЦ с ПГУ // Теплоэнергетика. 2007. № 11. С. 69-77.
3. **Цанев С.В.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций : учеб. пособие / С.В. Цанев, В.Д. Буров и др., М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 580 с.
4. **Дьяков. А.Ф., Березинец П.А., Грибов В.Б.** Теплофикационная парогазовая установка Северо-Западной ТЭЦ Санкт-Петербурга. Статические характеристики. Электрические станции 1996, №12, С. 9-16.
5. **Обуваев А.С.** Разработка и исследование аналитической модели ПГУ-450. Дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2011 г.

Андрюшин Кирилл Александрович,
ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский университет "МЭИ",
e-mail: andryushin.kiril@mail.ru

УДК 621.311.22

Б.Д. ТЕПЛОВ, аспирант
В.Д. БУРОВ, к.т.н, профессор каф. ТЭС

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"»
111250 г. Москва, ул. Красноказарменная, 14
Email: grigorypechorin1840@gmail.com

Исследование возможности расширения регулируемого диапазона ПГУ

Аннотация. Проведен расчетный анализ режимов частичной нагрузки ПГУ и выявлены факторы, ограничивающие нижний предел регулировочного диапазона нагрузок. Расчетные исследования выполнены с использованием математической модели ПГУ-410, верифицированной по результатам испытаний ПГУ-410 Невиномысской ГРЭС.

Ключевые слова: ТЭС, парогазовая установка, регулировочный диапазон

B.D. TEPLOV, graduate;
V.D. BUROV, Candidate of Engineering, professor

National Research University "Moscow Power Engineering Institute"
111250, Moscow, Krasnokazarmennaya 14
E-mail: grigorypechorin1840@gmail.com

Study the possibility of expanding adjustment range CCP

Abstract. An analysis of the calculated partial load PSU and identified factors that limit the lower limit of the adjustment range of loads. Calculations are made using a mathematical model, it CCP-410, verified by test results, there CCP-410 Nevinomisska TPP.

Key words: Thermal power plants, combined cycle plant, the adjustment range

В связи с возникновением в последние десять лет реального рынка электроэнергии повышаются требования к маневренности ТЭС: уменьшению продолжительности пусковых операций, расширению регулировочного диапазона нагрузок энергоблоков и скорости изменения нагрузок в его пределах. В настоящее время на отечественных ТЭС активно внедряются парогазовые моноблоки ПГУ-410, являющиеся одним из наиболее распространенных типов генерирующих установок на природном газе в мировой энергетике и по которым в российской энергетике опыт проектирования и эксплуатации только накапливается. Высокоэкономичные ПГУ, которые, в принципе, должны были бы использоваться в базовой части графика электрической нагрузки, неизбежно будут привлекаться к регулированию мощности в энергосистеме. Реализованные на территории России парогазовые установки большой мощности с трехконтурными котлами утилизаторами разработаны зарубежными производителями. Главными конкурентами на российском рынке мощных ГТУ и ПГУ на их основе являются европейские компании Siemens (с ГТУ SGT5-4000F), Alstom (с ГТУ GT26) и General Electric (с ГТУ MS9001FA). Таким образом, проведение исследований на примере парогазовых блоков данных производителей представляет особенный интерес.

В работе проведен расчетный анализ режимов частичной нагрузки ПГУ и выявлены факторы, ограничивающие нижний предел регулировочного диапазона нагрузок. Расчетные исследования выполнены с использованием математической модели ПГУ-410, верифицированной по результатам испытаний ПГУ-410 Невиномысской ГРЭС (SCC5-4000F Siemens).

Важным показателем маневренности ПГУ является технологический минимум нагрузки энергоблока или мощность, соответствующая нижней границе регулировочного диапазона нагрузок, которая в общем случае лимитируется:

- снижением надежности работы оборудования при снижении параметров пара за котлом – утилизатором;
- ухудшением экологических характеристик блока при работе на пониженных нагрузках;
- снижением экономичности оборудования блока при его работе на пониженных нагрузках.

Снижение надежности работы оборудования связано с увеличением влажности пара в последней ступени паровой турбины при снижении температуры пара контура высокого давления. Проведенные на основе разработанной модели ПГУ-410 расчеты показали, что снижение температуры отработавших в ГТУ газов при снижении мощности газовой турбины после полного прикрытия ВНА, приводящее к соответствующему снижению температуры пара высокого давления, при работе парового контура на скользящем давлении не создает опасности эрозионного износа рабочих лопаток последней ступени паровой турбины, т. к. влажность пара там не растет, а уменьшается.

Ухудшение экологических характеристик при снижении нагрузки ПГУ связано с технологическим изменением режима горения топлива в камере сгорания ГТУ. Для снижения выбросов оксидов азота на рабочих режимах ГТУ в их камерах сгорания осуществляется сжигание предварительно подготовленной топливо-воздушной смеси с избытками воздуха существенно большими, чем стехиометрические и умеренными (на уровне 1500 – 1600 °С) температурами процесса. При снижении нагрузки ГТУ, особенно после прикрытия ВНА компрессора, когда расход воздуха остается постоянным, а расход топлива продолжает снижаться, что вызывает увеличение избытка воздуха в КС, устойчивость такого горения может нарушаться. Чтобы избежать этого осуществляется переход на раздельную подачу воздуха и топлива в зону горения, которое происходит в этом случае в диффузионном режиме. Выбросы оксидов азота и СО при этом резко возрастают. Увеличение концентраций оксидов азота и углерода при изменении режима горения с предварительным смешением на диффузионный режим горения ограничивает технологический минимум нагрузки ПГУ. Технологический минимум нагрузки ПГУ-410, определенный в соответствии с указанными выше ограничениями, по результатам расчета составляет 45,8-47,3 % от номинальной мощности (табл. 1). При снижении температуры наружного воздуха увеличение расхода сжимаемого в компрессоре ГТУ воздуха обуславливает увеличение технологического минимума нагрузки ПГУ.

Авторами доклада разработан способ расширения диапазона нагрузок, в котором сжигание топлива в камере сгорания ГТУ осуществляется в режиме предварительного смешения с воздухом. Этот способ состоит в следующем. При достижении предельно-допустимого значения коэффициента избытка воздуха в камере сгорания ГТУ при разгрузке ПГУ дальнейшее снижение нагрузки осуществляется за счет

сброса части сжатого в компрессоре ГТУ воздуха на его вход (например, через АОС) с поддержанием значения коэффициента избытка воздуха на уровне, при котором обеспечивается достаточная устойчивость горения предварительно подготовленной топливо-воздушной смеси. Снижение нагрузки ПГУ в этом случае сопровождается увеличением температуры газов на выхлопе ГТУ. Значение максимально-допустимой температуры отработавших в ГТУ газов ограничивается с целью обеспечения надежной работы последней ступени и выхлопного патрубка газовой турбины. Таким образом, в этом случае увеличение температуры газов на выхлопе газовой турбины ограничивает технологический минимум нагрузки ПГУ. При температуре наружного воздуха равной -15°C за счет перепуска части (38 кг/с или 5.2 % от номинального значения) сжатого в компрессоре ГТУ воздуха на его вход технологический минимум нагрузки ПГУ-410 может быть снижен на 43 МВт и составит 161 МВт или 37,4 % номинальной мощности. При более высоких значениях температуры наружного воздуха вплоть до 23°C снижение технологического минимума нагрузки ПГУ-410 возможно, но в меньшей степени (табл. 1). Так при температуре наружного воздуха равной 15°C снижение технологического минимума нагрузки ПГУ составляет 7 МВт.

Таблица 1. Результаты расчета режимов технологического минимума нагрузки ПГУ-410 при разгрузке за счет перепуска части сжатого в компрессоре воздуха на его вход

Технологический минимум нагрузки (базовый вариант)								
$t_{\text{нв}}, ^{\circ}\text{C}$	20	15	10	5	0	-5	-10	-15
$\alpha_{\text{кс}}$	3,52	3,51	3,50	3,49	3,48	3,48	3,47	3,46
$N_{\text{ПГУ}}, \text{МВт}$	184,0	187,7	190,5	193,3	196,1	198,6	201,1	203,6
$N_{\text{ПГУ}}, \%$ от $N_{\text{ПГУ}}^{\text{НОМ}}$	46,1	45,9	45,8	45,9	46,1	46,5	47	47,3
$\eta_{\text{ПГУ}}, \%$	48,32	48,63	48,67	48,67	48,64	48,50	48,36	48,21
Технологический минимум нагрузки (при перепуске воздуха)								
$t_{\text{нв}}, ^{\circ}\text{C}$	20	15	10	5	0	-5	-10	-15
$\alpha_{\text{кс}}$	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
$N_{\text{ПГУ}}, \text{МВт}$	182,8	180,8	177,9	173,6	170,9	168,1	163,6	160,8
$N_{\text{ПГУ}}, \%$ от $N_{\text{ПГУ}}^{\text{НОМ}}$	45,8	44,3	42,8	41,2	40,2	39,3	38,2	37,4
$\eta_{\text{ПГУ}}, \%$	48,35	48,28	47,94	47,43	47,08	46,63	46,00	45,54

Четкого критерия определения нижней границы регулировочного диапазона по условию снижения тепловой экономичности не существует. По экономическим соображениям ПГУ целесообразно эксплуатировать на режимах с более высокими КПД, чем, например, на газомазут-

ных паровых энергоблоках СКД, работающих с КПД 35-40%. При глубокой разгрузке за счет перепуска части сжатого в компрессоре ГТУ воздуха на его вход КПД ПГУ-410 находится на уровне 48,4-45,5 % в диапазоне температур наружного воздуха от 20 °С до -15 °С, поэтому принципиальных технических препятствий для снижения нагрузок до такого уровня нет.

Теплов Борис Дмитриевич,
ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский университет "МЭИ",
e-mail: grigoryechorin1840@gmail.com
Буров Валерий Дмитриевич,
ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский университет "МЭИ",
e-mail: BurovVD@mpei.ru

УДК 621.928

С.И. ШУВАЛОВ¹ д.т.н., профессор;
О.А. ВОРОШИЛОВ², инженер

¹Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

E-mail: ShuvalovS@rambler.ru

²Черепетская ГРЭС имени Д.Г. Жимерина
301430 Тульская обл. г. Суворов, ул. Н. Островского, 1а

Зависимость эффективности улавливания пыли в циклонах ЦН-15 от равномерности ее структуры

Аннотация. Показано, что эффективность улавливания пыли в циклонах НИИОГАЗ значительно ниже указываемой в нормативных материалах по расчету пылеприготовительных установок. Показана зависимость эффективности улавливания от равномерности структуры пыли. Отмечено, что одним из возможных путей снижения пылевых выбросов является совершенствование конструкции сепараторов.

Ключевые слова: система пылеприготовления, циклон, фракционный к.п.д., коэффициент полидисперсности.

S.I. SHUVALOV Doctor of Engineering., professor;
O.A. VOROSHILOV, eng.

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

The dependence of the efficiency of dust collection in cyclones CN-15 from uniformity of its structure

Abstract. It is shown that the efficiency of dust collection in cyclones НИИОГАЗ significantly lower indicate a normative materials on the calculation of coal

preparation plants. The dependence of the capture efficiency of the uniform structure of dust. Noted that one of the possible ways to reduce dust emissions is to improve the design of the separator.

Key words: system pulverization, cyclone, fractional efficiency coefficient, structure of the dust.

В пылесистемах с шаровыми барабанными мельницами осаждение готовой пыли после сепаратора в промежуточный бункер производится в циклонах НИИОГАЗ типа ЦН-15. В рекомендациях по расчету систем пылеприготовления [1] указывается, что при очистке пыли, характеризующейся содержанием частиц крупнее 90 мкм $R_{90}=7...9\%$, к. п. д. циклона должно находиться в пределах 88...93%, и в расчетах следует принимать значение к.п.д. циклона $\eta_{ц} = 10\%$. Однако данные эксплуатации, а также результаты расчетов, выполненных по методике НИИОГАЗ [2,3], свидетельствуют о том, что в реальных условиях эффективность пылеулавливания циклонов значительно ниже заявленной в [1]. Данная работа представляет собой результаты анализа возможностей одного из вариантов повышения эффективности улавливания пыли в циклоне НИИОГАЗ наиболее распространенного и рекомендуемого к применению в системах пылеприготовления типа ЦН-15.

Ранее было показано [4], что увеличение эффективности пылеулавливания при сохранении аэродинамического сопротивления установки может быть достигнуто заменой цилиндрических циклонов типа ЦН-15 на конические типа СК-ЦН-33. При этом габариты циклонов должны быть увеличены, а плановая скорость газа снижена с 3,5 м до 1,86 м. Такое техническое решение может быть легко реализовано на стадии проектирования при выборе типов и типоразмеров оборудования, однако в условиях действующего производства неприемлемо из-за больших материальных и трудовых затрат на демонтаж старого и установки нового циклона.

Согласно методике расчета разработчиков конструкции циклонов НИИОГАЗ [2,3] фракционный к.п.д. циклона $\eta(\delta)$, определяющий вероятность осаждения в циклоне частиц размером δ , пропорционален комплексу

$$\frac{\delta}{\delta_{50ц} K \cdot 10^3 \sqrt{\frac{D\mu}{\rho_n w_{ц}}}}$$

Для того, чтобы изменить эффективность улавливания частиц размером δ , необходимо изменить конструкцию циклона (параметры $\delta_{50ц}$ или K), диаметр циклона D , расход газа (условную плановую скорость $w_{ц}$), удельную плотность материала улавливаемых частиц ρ_n или вязкость газа μ . При неизменной конструкции циклона осталь-

ные параметры определяются технологическим процессом и должны рассматриваться как неизменные величины. Поэтому и фракционные к.п.д. циклона также должны считаться неизменными.

Общий к.п.д. циклона рассчитывается по формуле

$$\bar{\eta} = \frac{G_{ул}}{G_{вх}} 100\% = \frac{\int_0^{\delta_{\max}} \eta_{\delta} f(\delta) d\delta}{100} = \frac{1}{100} \int_0^{\delta_{\max}} \eta_{\delta} dR(\delta).$$

Здесь $G_{вх}$, $G_{ул}$ - массовый расход частиц, поступивших в единицу времени в циклон и осевших в циклоне; δ_{\max} - максимальный размер поступающих в циклон частиц; $f(\delta)$ - плотность распределения по размерам поступающих в циклон частиц; $R(\delta)$ - кривая полных остатков, определяющая процентное содержание в смеси частиц крупнее δ .

Кривая полных остатков угольной пыли, измельченной в шаровой мельнице и прошедшей через центробежный сепаратор, хорошо согласуется с распределением Розина-Раммлера:

$$R(\delta) = 100 e^{-\left(\frac{\delta}{\delta_e}\right)^n},$$

где δ_e - размер частиц, для которого $R(\delta_e) = 36,8\%$; n - коэффициент полидисперсности, определяющий равномерность распределения частиц по размерам: при одинаковом δ_e с увеличением n в смеси уменьшается содержание более крупных и более мелких частиц. Величина коэффициента полидисперсности зависит от типа мельницы и эффективности разделения сепаратора пыли. Для пылесистем с шаровыми барабанными мельницами и сепаратором ТКЗ-ВТИ $n = 0,8 \dots 0,9$. Замена серийных сепараторов на более эффективную конструкцию позволяет увеличить равномерность пыли до $n = 1,15 \dots 1,25$.

Для оценки влияния равномерности подаваемой в циклон пыли на эффективность пылеулавливания по методике НИИОГАЗ были выполнены расчеты улавливания пыли с $R_{90} = 7\%$ и различным коэффициентом полидисперсности в циклонах диаметрами 0,5 м; 1 м; 2 м; 3,25 м; 4,25 м. Для большей наглядности эффективность улавливания оценивалась по величине проскока $\bar{\varepsilon} = 100 - \bar{\eta}$. Результаты расчета представлены на рис.1.

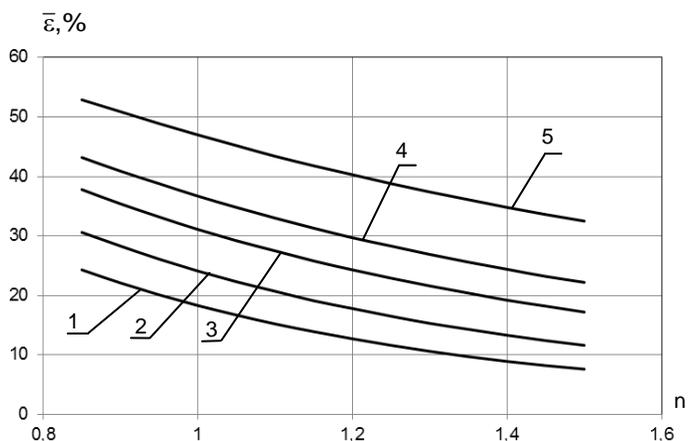


Рис.1. Зависимость величины проскока циклонов ЦН-15 от равномерности улавливаемой пыли.

Диаметры циклонов: 1 – 0,5 м; 2 – 1 м; 3 – 2 м; 4 – 3,25 м; 5 – 4,25 м

Из рисунка видно, что основным фактором, определяющим эффективность улавливания циклона, является его диаметр. На пылесистемах тепловых электростанций применяются циклоны диаметрами 2,5...4,25 м, поэтому наблюдаемая в условиях эксплуатации относительно низкая эффективность пылеулавливания обусловлена объективными причинами, в частности, конструкцией циклона. Вместе с тем одним из возможных резервов степени улавливания циклона является совершенствование работы сепараторов пыли, приводящее не только к увеличению производительности пылесистемы, но и к более глубокой очистке воздуха от мелких частиц.

Литература

1. **Лебедев А.Н.** Подготовка и размол топлива на электростанциях. - М.: Энергия, 1969.
2. **Циклоны НИИОГАЗ.** Руководящие указания по проектированию, изготовлению, монтажу и эксплуатации. – Ярославль, 1970.
3. **Справочник** по пыле- и золоулавливанию. М.: Энергоатомиздат, 1983.
4. **Шувалов С.И., Ворошилов О.А.** К выбору типа циклонов для систем пылеприготовления// II Международная научно-техническая конференция «Использование твердых топлив для эффективного и экологически чистого производства электроэнергии и тепла», М.- ВТИ, 28-29 октября 2014 г.

Шувалов Сергей Ильич.

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».
e-mail: ShuvalovS@rambler.ru

Ворошилов Олег Анатольевич.

Черепетская ГРЭС имени Д.Г. Жимерина.

УДК 621.311.22

Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, к.т.н., доцент,
С.Д. ГОРШЕНИН, инженер, А.А. КОРОТКОВ, 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 модели процесса термического разложения гидрокарбонатов в деаэраторах без парового барботажа

Аннотация. Предложен способ обработки результатов испытаний деаэраторов без парового барботажа, учитывающий влияние гидродинамической обстановки в баке на кинетику процессов термического разложения гидрокарбонатов.

Ключевые слова: деаэрация, гидрокарбонаты, декарбонизация.

G.V. LEDUKHOVSKY, Candidate of Engineering, docent
S.D. GORSHENIN, engineer
A.A. KOROTKOV, Candidate of Engineering, docent

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

Empirical determination the process model of thermal decomposition of hydrocarbons in deaerators without steam bubbling

Abstract. The authors suggested a method for processing test results of deaerator without steam bubbling which took into account the effect of hydrodynamic conditions in the tank on the kinetics of the thermal decomposition of hydrocarbons.

Key words: deaeration, hydrogen, decarbonization.

Разработка математической модели, позволяющей с требуемой точностью прогнозировать показатели эффективности удаления из воды в деаэраторах соединений угольной кислоты, является актуальной задачей. Использование такой модели в наладочных работах обеспечит сокращение затрат ресурсов на проведение опытов, а в практике проектирования – повышение степени обоснованности принимаемых технологических решений.

Основная нагрузка по удалению свободной и особенно химически связанных форм угольной кислоты в деаэраторах приходится на деаэраторный бак [1, 2]. В баке протекает процесс термического разложения гидрокарбонатов, включающий стадии химических превращений, молекулярной диффузии и дисперсного выделения газа из воды. Учи-

тывая, что температура в деаэрационном баке в режиме нормальной эксплуатации мало отличается от температуры насыщения, скорость образования диоксида углерода на химической стадии должна определяться только порядком реакции (который зависит от уровня концентрации исходного вещества в воде, то есть от общей щелочности воды). Диффузионная стадия и стадия дисперсного выделения газа зависят от гидродинамической обстановки в деаэрационном баке. Торможение результирующего процесса может наступать на любой из стадий в зависимости от режима работы деаэратора.

В общем случае можно описать протекание итогового процесса как реакцию первого или второго порядка:

$$dC / d\tau = -KC^n, \quad (1)$$

где C – массовая концентрация гидрокарбонатов в воде, K – константа скорости реакции; τ – время; n – порядок реакции.

Ранее нами выполнено обобщение экспериментальных данных по константе скорости реакции K [1]. При этом время пребывания воды в баке определялось как время вытеснения. Выяснилось, что экспериментальные значения константы скорости реакции K характеризуются существенным (около 50%) разбросом значений при одних и тех же значениях общей щелочности деаэрируемой воды. Такая точность модели хотя и превосходит точность прочих опубликованных данных, но недостаточна для решения поставленных в работе задач.

В настоящей работе выдвинута гипотеза, что наблюдаемый разброс значений K обусловлен влиянием гидродинамической обстановки в баке. Для решения задачи уточнения экспериментальных значений константы скорости реакции K использован программный комплекс Flow Vision, предназначенный для моделирования течений жидкости методом конечных объемов. По каждому из деаэраторов, задействованных в исследованиях, разработана геометрическая модель бака. Выбор граничных условий осуществлялся в соответствии с реальными режимными параметрами работы деаэраторов, имевшими место в условиях проведенных экспериментальных исследований [1]. В результате расчета определялось, в частности, время, затрачиваемое на прохождение через деаэрационный бак каждым из 1000 элементарных объемов воды, на которые разбивался общий поток жидкости в сечении перед деаэрационным баком (требуемое число разбиений, равное 1000, определялось в ходе специальных расчетов). Уточненное значение константы скорости процесса K определялось исходя из того, что это значение должно быть одинаковым для всех линий тока, поскольку температура воды в баке одинакова во всех точках. В этом случае конечная концентрация гидрокарбоната C_i , мкг-экв/дм³, в i -ом объеме воды составит:

$$C_i^{n-1} = C_0 \exp(-K_{n-1}\tau_i); C_i^{n-2} = (1/C_0 + K_{n-2}\tau_i)^{-1}, \quad (2)$$

где индексы $n = 1$ и $n = 2$ относятся соответственно к первому или второму порядку реакции; C_0 , мкг-экв/дм³ – начальная концентрация гидро-

карбонатов в воде на входе в деаэрационный бак; K – константа скорости реакции, $1/c$ ($n = 1$) или $кг/(мкг\text{-экв}\cdot c)$ ($n = 2$); τ_i, c – время пребывания в баке i -го объема воды.

Расчетное значение концентрации гидрокарбонатов в выходном сечении бака C , $мкг\text{-экв}/дм^3$, определялось как среднеарифметическое для всех линий тока (ввиду равенства массовых расходов воды в них). Уточненные значения K определялись с использованием выражений (2) путем подбора по условию совпадения расчетных и экспериментально-го значений концентрации гидрокарбонатов C в воде на выходе бака при условиях опытов. Выявлено, что распределение числа линий тока по времени пребывания воды в баке деформировано в сторону уменьшения времени, а время полного вытеснения не соответствует времени, отвечающему медиане полученного распределения, что и обуславливает отклонение значений константы скорости реакции, вычисляемой двумя способами.

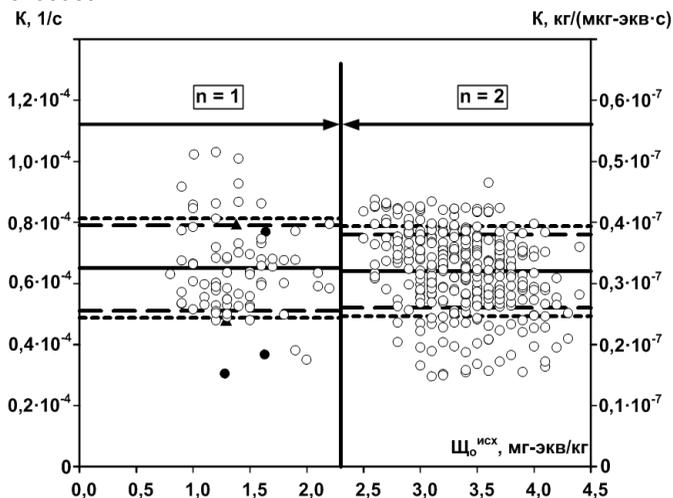


Рис. 1. Сводные данные по экспериментальным и рекомендуемым значениям констант скорости реакции процесса термического разложения гидрокарбонатов в атмосферных деаэраторах без парового барботажа в деаэрационном баке: n – порядок реакции; K – константа скорости процесса термического разложения гидрокарбонатов, $1/c$ ($n = 1$) или $кг/(мкг\text{-экв}\cdot c)$ ($n = 2$); $Щ_о^{\text{исх}}$ – общая щелочность воды перед деаэратором, $мг\text{-экв}/кг$; сплошные горизонтальные линии – рекомендуемые значения; штриховые линии – границы доверительного интервала погрешности определения рекомендуемых значений константы скорости реакции (доверительная вероятность 0,95); пунктирные линии – границы доверительного интервала погрешности определения константы скорости реакции, обусловленные метрологическими характеристиками методов измерения химических и теплотехнических параметров потоков теплоносителей (доверительная вероят-

ность 0,95); точки – экспериментальные данные для деаэраторов разных моделей (● – ДА-300м; ▲ – ДСА-300; ○ – ДА-50)

По результатам исследований статистически (методами анализа гипотез) доказана смена порядка реакции при общей щелочности Щ_0 воды около 2,3 мг-экв/кг, а также получены уточненные значения констант скорости реакции (рис. 1):

$$K = (0,65 \pm 0,14) \cdot 10^{-4} \text{ 1/с (n = 1) при } \text{Щ}_0 < 2,3 \text{ мг-экв/кг};$$

$$K = (0,32 \pm 0,06) \cdot 10^{-7} \text{ кг/(мкг-экв} \cdot \text{с) (n = 2) при } \text{Щ}_0 > 2,3 \text{ мг-экв/кг}.$$

Погрешность определения констант скорости реакции составила 21,5 % для $n = 1$ и 18,8 % для $n = 2$, что соответствует погрешности косвенного определения константы скорости реакции (23 %), обусловленной метрологическими характеристиками используемых методов измерения, прежде всего, щелочности воды (общей и по фенолфталеину). Дальнейшее уточнение данных возможно только при использовании более точных методов количественного химического анализа.

По результатам исследований создана методика прогнозирования показателей эффективности декарбонизации воды в деаэраторах, точность которой в 3,7 раза больше, чем точность существующих моделей.

Литература

1. **Особенности** декарбонизации воды термическими струйно-барботажными деаэраторами атмосферного давления / Барочкин Е.В., Мошкарин А.В., Виноградов В.Н. и др. // Теплоэнергетика. – 2012. № 7. С. 40–44.
2. **Шарапов, В.И.** Термические деаэраторы / В.И. Шарапов, Д.В. Цюра. – Ульянов. гос. техн. ун-т., 2003. – 560 с.

Ледуховский Григорий Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Горшенин Сергей Дмитриевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Коротков Александр Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

УДК 621.311.22

Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, к.т.н., доцент,
А.А. РАЗИНКОВ, студент

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

Разработка технологической схемы вакуумно-атмосферной деаэрационной установки с деаэраторами «ДСА» и «АВАКС»

Аннотация. Предложена схема комбинированной вакуумно-атмосферной деаэрационной установки, эффективная при реконструкции струйно-барботажных атмосферных деаэраторов, разработана методика расчета показателей эффективности деаэрации воды новой установкой

Ключевые слова: деаэрация, растворенный кислород, кавитация.

G.V. LEDUKHOVSKY Candidate of Engineering, docent
A.A. RAZINKOV, student

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

Development of technological scheme of vacuum-atmospheric deaerating unit with deaerators «DSA» and «AWACS»

Abstract. The authors proposed a scheme of a combined vacuum-atmospheric deaerating, effective at reconstruction of jet-bubbling atmospheric deaerator and the method of performance indicators calculation.

Key words: deaeration, dissolved oxygen, cavitation.

Струйно-барботажные деаэраторы серий «ДА» или «ДА-м», как правило, обеспечивают получение деаэрированной воды нормативного химического качества. Однако на энергообъектах России все ещё эксплуатируется большое количество атмосферных деаэраторов серии «ДСА», изготовленных в середине прошлого века. Конструкция таких деаэраторов не предусматривает парового барботажа ни в деаэратормом баке, ни в деаэрационной колонке. Эффективность деаэрации воды такими аппаратами обычно не удовлетворяет нормам. Часто такие деаэраторы реконструируются с организацией парового барботажа, и тогда это решает проблему качества деаэрированной воды. Однако в ряде случаев такая реконструкция экономически не целесообразна или вовсе не возможна, поскольку барботажный пар должен иметь давление, большее, чем давление основного пара. Для одного из таких случаев выполнена разработка рассматриваемого технического решения.

Рассматривается деаэратор ДСА-100 со струйной колонкой, включающей два струйных отсека. Основная режимная характеристика деаэратора, полученная экспериментальным путем при исходной массовой концентрации растворенного кислорода $C_0 = 7020 \text{ мкг/дм}^3$, показана на рис. 1. Видно, что нормативная массовая концентрация растворенного в деаэрированной воде кислорода $C_H = 50 \text{ мкг/дм}^3$ обеспечивается не во всем регулировочном диапазоне нагрузок деаэратора.

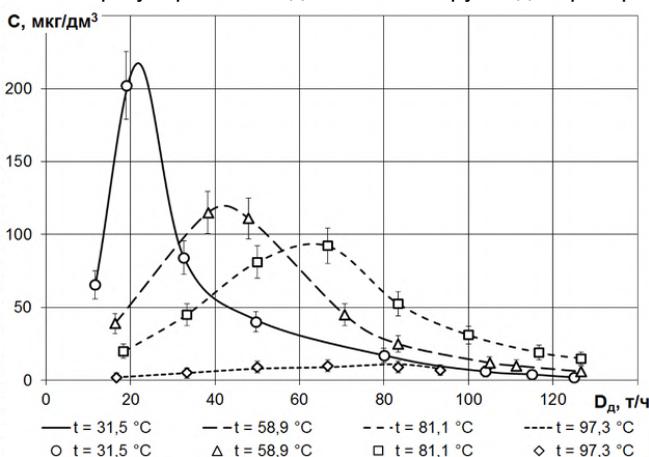


Рис. 1. Основная режимная характеристика деаэратора ДСА-100: D_d – расход деаэрированной воды; C – массовая концентрация растворенного кислорода в деаэрированной воде; t – температура воды перед деаэратором; точки - экспериментальные данные; линии – аппроксимация опытных данных

В качестве одного из вариантов реконструкции установки, альтернативного организации парового барботажа в деаэраторе, рассматривается установка дополнительного деаэрационного устройства на базе деаэратора «АВАКС» номинальной производительностью 130 т/ч (максимально – 160 т/ч).

Деаэраторы «АВАКС» представляют собой вакуумно-атмосферные кавитационные струйные прямоточные деаэрационные устройства. К настоящему времени они нашли широкое применение в энергетике, однако их эффективность невелика: например, эффект деаэрации по растворенному кислороду, представляющий собой отношение разности массовых концентраций газа в деаэрируемой воде до и после аппарата к массовой концентрации газа в исходной воде, как правило, не превышает $\xi = 90 \%$. Для атмосферного струйно-барботажного деаэратора серии «ДА-м» значение этого показателя существенно больше: $\xi = 99,5 \%$ и выше. Низкая эффективность деаэраторов «АВАКС» обусловлена тем, что этот аппарат одноступенча-

тый, прямоточный, характеризуется малым располагаемым временем процесса деаэрации. К преимуществам следует отнести его малые размеры, металлоемкость, а также отсутствие потребности в греющем паре.

На основании результатов испытаний деаэратора «АВАКС» ранее [1] выявлено, что использование таких аппаратов в качестве основного деаэрационного устройства на энергообъектах целесообразно только при включении деаэратора по схеме с рециркуляцией. Требуемая кратность рециркуляции может достигать нескольких десятков. Например, при $C_0 = 7000 \text{ мг/дм}^3$ и $\xi = 0,85$ (по результатам испытаний) кратность циркуляции K , необходимая для получения деаэрированной воды с $C = 50 \text{ мг/дм}^3$, составляет не менее 24,5 (при лучшей из возможных схем рециркуляции). При таких значениях K существенно возрастают удельные затраты электроэнергии на деаэрацию воды.

Схема технического решения при реконструкции рассматриваемого деаэратора ДСА-100 с использованием деаэрационного устройства «АВАКС» выбрана по результатам вариантных расчетов и предусматривает установку «АВАКС» на линии рециркуляции деаэрированной воды, забираемой насосом после «ДСА», со сбросом воды из «АВАКС» на вход деаэратора «ДСА». Полагая температуру воды перед деаэратором ДСА-100 неизменной и равной 70°C (в настоящее время отсутствуют экспериментальные данные, характеризующие работу деаэратора «АВАКС» при другой температуре), а также приняв характерные для атмосферных деаэраторов энтальпии греющего пара и выпара, получено расчетное выражение для определения остаточной концентрации растворенного в деаэрированной воде кислорода:

$$C = C_0 / \left[\xi K + 1,1236 + \xi_{\text{ДСА}} (1 + K) / (1 - \xi_{\text{ДСА}}) \right], \quad (1)$$

где ξ – эффект деаэрации; K – кратность циркуляции; $\xi_{\text{ДСА}}$ – относительный эффект деаэрации в деаэраторе ДСА. Значение $\xi_{\text{ДСА}}$ определяется по основной режимной характеристике деаэратора ДСА (рис. 1) для заданной температуры исходной воды при каждом значении расхода деаэрированной воды как $\xi_{\text{ДСА}} = 1 - C / C_0$.

Результаты расчета рассматриваемой схемы представлены в виде основной режимной характеристики установки на рис. 2.

Таким образом, установка дополнительного деаэрационного устройства типа деаэратора «АВАКС» позволяет получать воду требуемого химического качества во всем диапазоне изменения гидравлической нагрузки установки путем регулирования кратности циркуляции K .

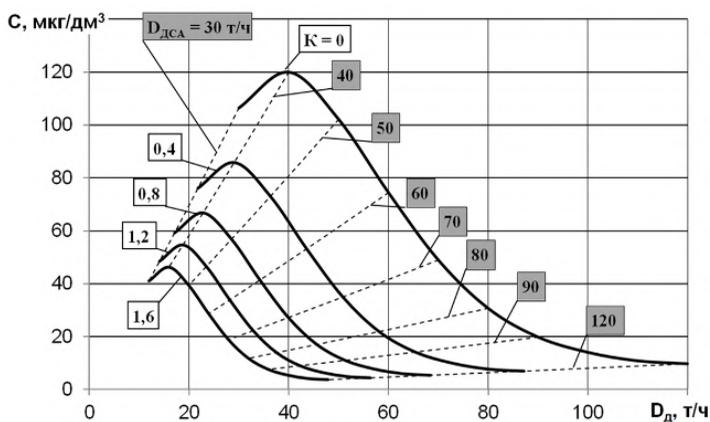


Рис. 2. Основная режимная характеристика вакуумно-атмосферной деаэрационной установки на базе деаэраторов «ДСА» и «АВАКС»: D_d – расход деаэрированной воды потребителям; K – кратность циркуляции; $D_{дса}$ – расход деаэрированной воды ДСА-100

Литература

1. **Выбор** схемы включения прямоточных деаэрационных устройств / Шатова И.А., Барочкин Е.В., Ледуховский Г.В. // Повышение эффективности тепло-энергетического оборудования // IV Рос. науч. – практ. конф.: 18-19 нояб. 2005 г. Материалы конференции. / Под. ред. А.В. Мошкарин – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2005. – 250 с. С. 63-65.

Ледуховский Григорий Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Разинков Антон Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

УДК 658.264

А.И. КИСЕЛЕВ, к.т.н., доцент,
А.Л. ВИНОГРАДОВ, к.т.н., заведующий каф.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфakovская, 34
E-mail: kiselov77@yandex.ru

Моделирование теплового состояния статора паровых турбин для компьютерных тренажеров энергоблоков ТЭС

Аннотация. В работе рассмотрен подход к моделированию теплового состояния статора мощных паровых турбин для компьютерных тренажеров на основе метода конечных элементов.

Ключевые слова: ТЭС, турбина, статор, конечные элементы.

A.I. KISELOV Candidate of Engineering, docent,
A.L. VINOGRADOV Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003. Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: kiselov77@yandex.ru*

Modeling a thermal state of a steam-turbine's stator for integration into the computer-based training complexes of the power generating units at the thermal power-plants

Abstract. Publication contains methodology review of the modeling a thermal state of the stators used in the powerful steam-turbines for the purposes of the computer-based training complexes, based on the finite element method.

Key words: thermal-power plant, turbine, stator, finite element method.

Одной из основных задач современной теплоэнергетики является повышение надежности, экономичности и маневренности действующего оборудования. Решение этих задач осуществимо за счет улучшения качества эксплуатации оборудования. Большие возможности для этого открывает создание средств тренажа операторов на базе современной вычислительной техники.

Для подготовки оперативного персонала и прогнозирования процессов в компьютерном тренажере математическая модель должна в большинстве эксплуатационных режимов моделировать всю существенную информацию, которой располагает оперативный персонал ТЭС, что в свою очередь определяет состав и структуру математической модели.

Основой модели паровой турбины должно быть математическое представление процесса расширения рабочего тела в проточной части. При изменении режима работы турбоустановки меняется и распреде-

ление температур пара. Основным следствием изменения температуры является возникновение в деталях турбины нестационарного распределения температурных полей, приводящее к возникновению температурных напряжений [1].

В массивных элементах конструкции, таких как статор турбоагрегата, термонапряжения могут достигать достаточно высоких значений, и при некоторых условиях приводить к разрушению корпуса турбины. Таким образом, маневренные свойства паровой турбины в основном определяются динамикой теплового состояния элементов ее конструкции [1]. В связи с этим в процессе эксплуатации турбоустановки осуществляется постоянный контроль распределения температур металла по поперечному сечению корпуса паровой турбины в районе паровпуска. Выбор места контроля очевиден: в районе паровпуска толщина корпуса и температуры пара максимальны, что приводит к возникновению наибольших по абсолютной величине температурных напряжений. Возникновение опасных значений термонапряжений исключается соблюдением во всех эксплуатационных режимах разностей температур металла между характерными точками поперечного сечения корпуса турбины в районе паровпуска, что и является основным фактором, ограничивающим скорости изменения нагрузки турбоагрегата.

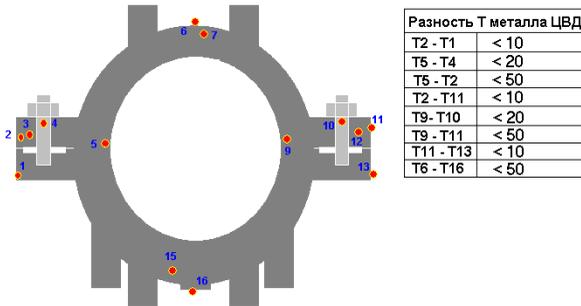


Рис. 1. Схема контроля теплового состояния корпуса паровой турбины

Таким образом, в математической модели паровой турбины наряду с расчетом параметров пара по проточной части должно учитываться изменение теплового состояния металла статора. А для имитации режимов эксплуатации турбоустановки в компьютерном тренажере вполне достаточно лишь воспроизведения температурного поля по поперечному сечению корпуса турбины в районе паровпуска, что и является целью данной работы.

Тепловое состояние металла статора турбоагрегата определяется режимом работы энергоблока в целом, поэтому решение поставленной задачи является весьма сложной проблемой.

В связи с этим было сделано допущение. Расчетная схема распределения температуры металла по поперечному сечению корпуса турбины была искусственно вычленена из тепловой схемы энергоблока. Все остальные элементы, не включенные в рассматриваемую расчетную схему, в частности котельный агрегат, подводящие паропроводы, система регулирования турбины, система подачи пара на обогрев фланцев, регенеративные подогреватели, окружающий воздух, представляются в виде внешних источников, отражающих влияние внешней среды по отношению к металлу статора турбины. С учетом такой постановки задачи входными параметрами модели теплового состояния металла корпуса, т.е. величинами, считающимися известными в любой момент времени, являются:

- температура пара и коэффициент теплоотдачи на участке подводящих паропроводов: $t_{п}, \alpha_{п}$;
- температура пара и коэффициент теплоотдачи внутри корпуса турбины: $t_{к}, \alpha_{к}$;
- температура пара и коэффициент теплоотдачи в обнлизке: $t_{о}, \alpha_{о}$;
- температура воздуха в машзале $t_{в}$ и коэффициент теплопередачи от наружной поверхности корпуса к воздуху $k_{в}$, учитывающий термическое сопротивление изоляции, т.е теплообмен приводится к наружной поверхности статора турбины.

Для интеграции в общую модель энергоблока математическая модель теплового состояния корпуса турбины должна в любой момент времени обеспечивать расчет распределения температур металла по поперечному сечению статора в районе паровпуска $t_{м}(x,y)$, что, собственно, и является выходом модели.



Рис. 2. Схема интеграции модели теплового состояния турбины в модель блока

При условии равномерного обогрева корпуса турбины в качестве расчетной области был принят сектор симметрии 90° . Внешняя граница расчетной области представляется совокупностью участков, на каждом из которых задано свое граничное условие (3).

Распределение температур металла внутри расчетной области описывается уравнением теплопроводности

$$-\left[\frac{\partial^2 t_{м}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_{м}}{\partial y^2} \right] + \frac{c \rho}{\lambda} \frac{\partial t_{м}}{\partial \tau} = 0, \quad (1)$$

$$t_m(x, y, \tau = 0) = t_{m,0}(x, y), \quad (2)$$

$$-\lambda \frac{\partial t_m}{\partial \vec{n}} \Big|_{\Gamma_i} = \alpha_i [t_i - t_m(\Gamma_i)], \quad (3)$$

где c , ρ , λ – удельная теплоемкость, плотность и теплопроводность металла; i – порядковый номер участка внешней границы расчетной области; Γ_i – i -ый участок границы расчетной области; α_i , t_i – коэффициент теплоотдачи и температура среды, омывающей Γ_i [2].

Граница рассматриваемой расчетной области имеет достаточно сложную форму, поэтому задача была решена методом конечных элементов, приняв в качестве конечного элемента линейный треугольник [2].

Сравнение результатов вычислений с реальными данными, полученными при пуске блока ТЭС из холодного состояния, позволило сделать заключение, что разработанная модель позволяет в реальном масштабе времени имитировать тепловое состояние металла корпуса турбины в различных режимах работы энергоблока.

Литература

1. **Тепловое** состояние высокоманевренных паровых турбин / Л.П. Сафонов, К.П. Селезнев, А.Н. Коваленко. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 295 с.
2. **Зенкевич. О.**, Морган. К. Конечные элементы и аппроксимация: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 318 с.

Киселев Андрей Игоревич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kiselov77@yandex.ru

Виноградов Андрей Львович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: val@tren.ispu.ru

УДК 621.186.85

А.Е. БАРОЧКИН, к.т.н., доцент

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

Определение структуры тепловой нагрузки в горячей воде потребителей, подключённых к источнику централизованного теплоснабжения

Аннотация. Показана методика определения фактической тепловой нагрузки потребителей, подключённых к тепловой сети источника централизованного теплоснабжения на основании данных учёта количества отпущенной тепловой энергии.

Ключевые слова: тепловая сеть, теплофикация.

A.E. BAROCHKIN Candidate of Engineering, docent

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

Determining the structure of heat load in hot water for consumers connected to the source of centralized heat supply

Abstract. The author has shown a method for determining the actual heat load of consumers connected to a heating network of a source of centralized heat supply based on data of accounting amount of released heat.

Key words: heating network, district heating.

Отпуск тепловой энергии с горячей водой с коллекторов источников централизованного теплоснабжения определяется расходами тепла на отопление, горячее водоснабжение (ГВС) и вентиляцию потребителей, а также потерями в тепловых сетях.

Приблизительные значения договорной тепловой нагрузки потребителей на нужды отопления, вентиляции и горячего водоснабжения указываются в контрактах на теплоснабжение, заключаемых потребителями с теплоснабжающими организациями. Однако данные величины чаще всего являются завышенными.

Необходимость точного определения тепловой нагрузки потребителей обусловлена следующими причинами:

1. Завышение тепловых нагрузок потребителей приводит к неправильному определению величины резерва или дефицита тепловой мощности источников тепловой энергии.
2. При проектировании новых источников теплоснабжения завышение тепловых нагрузок потребителей может привести к дополнительным капитальным затратам при строительстве, а также к низкой

загрузке теплофикационного оборудования и увеличению удельного расхода топлива на выработку тепловой энергии.

3. Тепловые нагрузки потребителей являются основными исходными данными для разработки нормативных энергетических характеристик тепловых сетей. Отсутствие достоверных нормативов не позволяет проводить полноценный анализ энергоэффективности сетей.

Для определения фактической тепловой нагрузки, подключённой к источнику централизованного теплоснабжения, необходима организация качественного учёта отпущенной тепловой энергии с горячей водой в сеть. Для этого должны применяться коммерческие приборы учёта, которые фиксируют параметры (температура, расход, теплосодержание) отпускаемого в тепловую сеть и возвращаемого от потребителя теплоносителя в течение дня.

На практике такой учёт чаще всего присутствует только на ТЭЦ, а водогрейные котельные производят приблизительный расчёт количества отпущенной тепловой энергии по косвенным признакам: величине сожжённого топлива при известном теплосодержании, количеству денег, полученному от потребителей за поставленную тепловую энергию.

В качестве примера произведём расчёт фактической тепловой нагрузки Орской ТЭЦ-1 в 2013 г. Договорная нагрузка потребителей ТЭЦ в данный период составляла 498,4 Гкал/ч.

При наличии данных учёта количества тепла, отпущенного в тепловую сеть по дням за один год составляется график отпуска тепловой энергии с горячей водой от источника теплоснабжения в зависимости от температуры наружного воздуха (рис. 1). Полученное множество точек ограничено по температуре наружного воздуха точкой излома температурного графика на ГВС (для Орской ТЭЦ-1 при 0 °С).

Из анализа рис. 1 следует, что минимальная температура наружного воздуха за отопительный период расчётного года составляла - 20 °С, в то время как минимальная температура в отопительный период для данного региона составляет - 31 °С. Для вычисления максимально возможной тепловой нагрузки источника теплоснабжения выполняется прогноз увеличения отпуска тепловой энергии с помощью линии тренда. Данная величина включает в себя следующие составляющие:

$$Q_{и}^{о.п} = Q_{от+в} + Q_{ГВС}^{о.п} + Q_{пот}^{о.п}, \quad (1)$$

где $Q_{и}^{о.п}$ - фактическая подключённая тепловая нагрузка источника централизованного теплоснабжения в отопительный период; $Q_{от+в}$ - расчётная тепловая нагрузка отопления и вентиляции; $Q_{ГВС}^{о.п}$ - тепловая нагрузка ГВС в отопительный период; $Q_{пот}^{о.п}$ - потери в тепловых сетях в отопительный период.

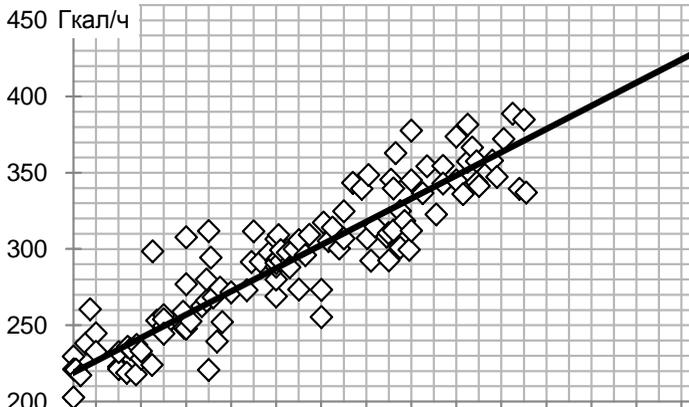


Рис. 1. Количество тепла, отпускаемого с горячей водой в тепловую сеть в отопительный период 2013 г.

Для того чтобы выделить из полученного значения тепловую нагрузку ГВС, необходимо произвести анализ среднечасового отпуска тепловой энергии в сеть в неотапливаемый период, когда нагрузка отопления и вентиляции минимальна и может не учитываться:

$$Q_{и}^{о.п} = Q_{ГВС}^{н.п} + Q_{пот}^{н.п}, \quad (2)$$

где $Q_{и}^{о.п}$ - среднечасовой отпуск тепла в сеть в неотапливаемый период; $Q_{ГВС}^{н.п}$ - тепловая нагрузка ГВС в неотапливаемый период; $Q_{пот}^{н.п}$ - потери в тепловых сетях в неотапливаемый период.

Среднедневная тепловая нагрузка горячего водоснабжения определяется расходом горячей воды у потребителей, который почти не меняется в течение года. Изменение количества тепла на нужды ГВС в отопительном и неотапливаемом периоде обусловлено разной температурой холодной водопроводной воды в течение года:

$$Q_{ГВС}^{о.п} = Q_{ГВС}^{н.п} \cdot \frac{t_{ГВ} - t_{ХВ}^{н.п}}{t_{ГВ} - t_{ХВ}^{о.п}} = Q_{ГВС}^{н.п} \cdot \frac{55 - 15}{55 - 5} = 1,25 \cdot Q_{ГВС}^{н.п}, \quad (3)$$

где $t_{ГВ}$ - нормативная температура горячей воды; $t_{ХВ}^{н.п}$ - температура холодной водопроводной воды в неотапливаемый период; $t_{ХВ}^{о.п}$ - температура холодной водопроводной воды в отопительный период.

Основную сложность в данном расчёте составляет определение фактически потерь тепловой энергии через тепловую изоляцию тепловых сетей, которые в нарушение требований «Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей РФ» практически

нигде не проводятся. Причина заключается в трудоемкости и дороговизне испытаний, в необходимости отключения потребителей.

Для Орской ТЭЦ-1 имеются результаты испытаний в соответствии, с которыми фактические тепловые потери в отопительный период составляют 29,61 Гкал/ч, в неотапливаемый - 20,75 Гкал/ч.

Результаты расчёта фактической тепловой нагрузки потребителей ТЭЦ-1 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Фактические данные отпуска тепловой энергии с горячей водой от ТЭЦ-1 за 2013 г.

Достигнутый максимум отпуска тепловой энергии, Гкал/ч	388,8
Достигнутый максимум отпуска тепловой энергии, приведённый к расчётной температуре наружного воздуха, Гкал/ч	454,0
Отпуск тепловой энергии на нужды ГВС в неотапливаемый период, Гкал/ч:	-
- средний	37,5
- максимальный	57,3
Фактическая тепловая нагрузка потребителей, Гкал/ч:	424,4
- отопление и вентиляция	377,5
- ГВС (средненедельная)	46,9

Барочкин Алексей Евгеньевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: acorp27@yandex.ru

УДК 621.321

А.Л. ВИНОГРАДОВ, к.т.н, доцент, А.И. КИСЕЛЁВ, к.т.н, доцент
А.А. КРАСНОВ, ассистент

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

Разработка блочной модели осевого компрессора энергетической газотурбинной установки

Аннотация. Приведены основные принципы и уравнения для построения блочной модели осевого компрессора газотурбинной установки. Показана область применимости методики моделирования, её достоинства и недостатки.

Ключевые слова: осевой компрессор, газотурбинная установка, математическое моделирование, блочная модель.

A.L. VINOGRADOV Candidate of Engineering Sciences, professor,
A.I. KISELYOV Candidate of Engineering Sciences, docent,
A.A. KRASNOV assistant

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

Developing a block model of an axis-flow compressor working in an energy gas-turbine unit

Abstract. The main principles and equations for developing block model of an axis-flow compressor working in an energy gas-turbine unit are shown. The field of application, pros and cons of given methodology are described.

Key words: axis-flow compressor, gas-turbine unit, mathematical modeling, block model.

Компрессор является неотъемлемой частью любой газотурбинной установки и поэтому оказывает существенное влияние на работу ГТУ. Компрессор определяет давление рабочего тела в камере сгорания и перед газовой турбиной, что прямо влияет на мощность и КПД ГТУ. Не менее важно влияние расхода воздуха через компрессор. Задачей данной модели и является определение всех этих параметров в зависимости от различных внешних факторов.

Характеристики компрессора существенно зависят от параметров воздуха на входе. Изменение температуры атмосферного воздуха (рабочее тело компрессора) приводит к изменению плотности воздуха и, следовательно, к изменению расхода воздуха компрессора. Изменение давления и влажности атмосферного воздуха в меньшей степени влияют на плотность воздуха и, следовательно, мало влияют на расход воздуха компрессора.

Для управления расходом воздуха компрессора предназначен входной направляющий аппарат (ВНА), расположенный на входе в рабочие лопатки первой ступени компрессора. Лопатки ВНА турбокомпрессора ГТД-110 поворотного типа. Угол поворота изменяется в пределах.

$$\Delta \alpha_{\text{ВНА}} = 0^{\circ} \div - 35^{\circ}$$

Изменение угла поворота лопаточного аппарата ВНА на величину $\Delta \alpha_{\text{ВНА}}$ позволяет изменять осевую (аксиальную) составляющую скорости C_{1A} входа потока в каналы рабочей решетки первой ступени компрессора. В результате этого изменяется массовый расход воздуха через первую ступень компрессора:

$$G_B = \rho_B \cdot F_{CT} \cdot C_{1A}.$$

Здесь G_B – массовый расход воздуха, кг/с; ρ_B – плотность воздуха, кг/м³; F_{CT} – аксиальная площадь проходного сечения ступени, м²; C_{1A} – осевая составляющая скорости C_1 , м/с.

Следует отметить, что изменение положения лопаток ВНА, при регулировании расхода воздуха компрессора, приводит к росту аэродинамического сопротивления ВНА.

Таким образом, управление ВНА позволяет изменить проходное сечение на входе в проточную часть компрессора и тем самым получать необходимые характеристики компрессора в зависимости от режима работы ГТУ.

Приведённый расход воздуха компрессора определяется по формуле, кг/с,

$$G_{В\text{ ПР}} = G \cdot (p_{\text{ПР}} / p_{\text{Н}}) \cdot [(z / z_{\text{ПР}}) \cdot (R / R_{\text{ПР}}) \cdot (T_{\text{Н}} / T_{\text{ПР}})]^{0,5}, \text{ где}$$

а) параметры приведения (обычно принимают):

$p_{\text{ПР}} = 1,013$ бар; $T_{\text{ПР}} = 293$ К; $R_{\text{ПР}} = 0,287$ кДж/(кг·К); коэффициент сжимаемости $z_{\text{ПР}} = 1$.

б) действительные параметры воздуха на входе в компрессор:

G – действительный массовый расход воздуха компрессора (кг/с) при начальных условиях на входе в компрессор: давление $p_{\text{Н}}$ (бар), температура $T_{\text{Н}}$ (К), газовая постоянная R (кДж/(кг·К)) и коэффициент сжимаемости z (Па^{-1}). Учитывая, что при небольших скоростях и отсутствии теплообмена, имеющих место на входе в компрессор, сжимаемость газа слабо проявляется, будем полагать $z = z_{\text{ПР}}$. Допуская, что $R = R_{\text{ПР}}$, получим формулу для определения расхода воздуха при параметрах, отличных от параметров приведения, кг/с,

$$G = G_{В\text{ ПР}} \cdot (p_{\text{Н}} / p_{\text{ПР}}) \cdot (T_{\text{ПР}} / T_{\text{Н}})^{0,5}$$

Определение параметров рабочего тела (воздух) в конце обратимого адиабатного сжатия

Параметры воздуха на выходе из компрессора в теоретическом процессе (точка 2t) определяются следующим образом:

а) относительное давление

$$\varepsilon_1 = p_2 / p_1 = \pi_{02t} / \pi_{01} \rightarrow \pi_{02t} = \pi_{01} \cdot (p_2 / p_1) = \pi_{01} \varepsilon_1;$$

б) энтропия, энтальпия и температура воздуха – как функция относительного давления:

$$t_{2t}, h_{2t}, s^0_{2t} = f(\pi_{02t});$$

Вычисление параметров воздуха, отбираемого из компрессора

Из проточной части компрессора и после последней ступени компрессора организованы отборы воздуха на охлаждение лопаточного аппарата газовой турбины и компенсацию осевого усилия.

Для определения параметров отбираемого воздуха за 5-й, 7-й, 10-й и 15-й (последней) ступенями компрессора сделаем допущение равенства создаваемых напоров ступенями компрессора:

$$\Delta p_{\text{СТ К}} = \Delta p_{\text{К}} / z = (p_2 - p_1) / z,$$

где $z = 15$ – число ступеней компрессора.

Удельная работа компрессора

Удельная работа (в расчете на 1 кг проходящего рабочего тела) компрессора в обратимом (теоретическом) процессе без учета отбора воздуха из проточной части компрессора, кДж/кг,

$$l_{\text{к т}} = c_{\text{РВ}} (T_{2t} - T_1) = h_{2t} - h_1$$

Удельная работа компрессора (на единицу массы рабочего тела) в необратимом (реальном) процессе без учета отбора воздуха из проточной части компрессора на охлаждение элементов газовой турбины, кДж/кг,

$$\ell_k = h_2 - h_1 = \ell_k t / \eta_{oi}^k$$

Вычисление параметров рабочего тела (воздух) в конце необратимого адиабатного сжатия без учета отбора воздуха из проточной части компрессора

Теплосодержание рабочего тела (воздуха) в конце необратимого процесса сжатия в компрессоре, кДж/кг,

$$h_2 = h_1 + \ell_k$$

По значению h_2 находим необходимые значения параметров рабочего тела (t_2, s_2^0, π_{02}):

$$t_2, s_2^0, \pi_{02} = f(h_2)$$

Давление на выходе из компрессора

$$\varepsilon_1 = p_2 / p_1 \rightarrow p_2 = \varepsilon_1 \cdot p_1$$

Энтропия идеального газа при произвольном давлении и температуре вычисляется по формуле

$$s(T, p) = s^0(T) - R \ln p$$

Здесь h – кДж/кг; R, s – кДж/(кг · К); p – бар; T – К.

Используя данную зависимость, получим, кДж/(кг · К),

$$\Delta s = s_2 - s_1 = s_2^0(T_2) - s_1^0(T_1) - R \cdot \ln(p_2 / p_1) = s_2^0 - s_{2t}^0.$$

$$s_2 = s_1 + \Delta s$$

Удельная работа (в расчете на 1 кг проходящего рабочего тела) компрессора в необратимом процессе с учетом отбора воздуха из проточной части компрессора (см. табл. 7), кДж/кг,

$$\begin{aligned} \ell_k &= 1,0 \cdot \ell_k^{(5)} + (1,0 - 0,003) \cdot (\ell_k^{(7)} - \ell_k^{(5)}) + \rightarrow \\ &\rightarrow + (1,0 - 0,003 - 0,019) \cdot (\ell_k^{(10)} - \ell_k^{(7)}) + \rightarrow \\ &\rightarrow + (1,0 - 0,003 - 0,019 - 0,039) \cdot (\ell_k^{(15)} - \ell_k^{(10)}) = \\ &= 1,0 \cdot \ell_k^{(5)} + 0,997 \cdot (\ell_k^{(7)} - \ell_k^{(5)}) + \rightarrow \\ &\rightarrow + 0,978 \cdot (\ell_k^{(10)} - \ell_k^{(7)}) + 0,939 \cdot (\ell_k^{(15)} - \ell_k^{(10)}). \end{aligned}$$

Уточняем параметры воздуха в конце необратимого процесса сжатия в компрессоре с учетом отбора воздуха из проточной части компрессора, кДж/кг:

$$h_2 = h_1 + \ell_k; \quad t_2, s_2^0, \pi_{02} = f(h_2).$$

Виноградов Андрей Львович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: rvs@tren.ispu.ru

Киселев Андрей Игоревич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: rvs@tren.ispu.ru

Краснов Александр Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: rvs@tren.ispu.ru

УДК 621.311.22

Е.Ю. ГРИГОРЬЕВ, к.т.н., ст. преподаватель,
П.С. ХАЗОВ, студент

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

Совершенствование работы выхлопных патрубков газотурбинных установок

Аннотация. Представленные результаты показывают, что наиболее естественным способом повысить экономичность и мощность ГТУ как новых, так и существующих можно за счет использования широкоугольных диффузоров с большими степенями расширения в системах выхлопных патрубков.

Ключевые слова: газотурбинная установка, аэродинамика, выхлопной патрубок, диффузор, пульсации давления, виброненадежность.

E.Yu. GRIGORIEV, Candidate of Engineering, senior Teacher,
P.S. HAZOV, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: rvs@tren.ispu.ru*

Improving the performance of the pipes gas turbines

Abstract. These results demonstrate that the most natural way to improve the efficiency of gas turbines and power of both new and existing can be due to the use of wide-angle diffuser with a large expansion in the exhaust nozzle systems.

Key words: gas turbine, aerodynamics, exhaust pipe, diffuser, pressure pulsations, vibration.

Основным отличием газовой турбин от паровых состоит в существенно меньшем располагаемом перепаде энтальпий на её проточную часть, т.к. за последней ступенью этой турбины давление выходящих газов оказывается близко к атмосферному и способы его снижения крайне ограничены, практически для его снижения используют диффузорный эффект, суть которого сводится к преобразованию кинетической энергии потока, покидающего последнюю ступень турбины, в потенциальную энергию давления.

Для такого преобразования чаще всего используют геометрические диффузоры, представляющие собой каналы с непрерывно увеличивающейся площадью в направлении движения рабочего тела. В газовых турбинах наиболее часто используются развитые кольцевые диффузоры с достаточно высокой степенью расширения n ($n=F_2/F_1$, где F_1 - площадь входного сечения диффузора, а F_2 его выходная площадь).

Согласно опытным данным в кольцевом диффузоре при степени расширения $n=4$, равномерном поле скоростей в его входном сечении и безотрывном течении коэффициент восстановления энергии ξ может достигать $80 \div 83\%$. То есть, примерно 80% кинетической энергии потока, выходящего из газовой турбины, может быть преобразовано в потенциальную энергию. Для современных мощных высокотемпературных газовых турбин это означает возможность снизить давление за последней ступенью с $p_2=1,05$ бар до $p_2=0,92 \div 0,94$ бар, увеличить за счет снижения указанного давления мощность турбины на $6 \div 8\%$.

Реальный эффект от установки таких диффузоров за газовой турбиной оказывается существенно меньшим, т.к. за последней ступенью поток характеризуется значительной радиальной неравномерностью поля скоростей и направление этих скоростей может заметно отличаться от осевого направления. Кроме того, в проточной части таких диффузоров располагается мощные крепежные ребра, существенно увеличивающие аэродинамические сопротивления. В результате коэффициент восстановления энергии снижается до $45 \div 50\%$ и реальный прирост мощности редко превышает $3 \div 4\%$ при очень больших осевых габаритах рассматриваемых диффузоров.

Габариты диффузора могут заметно превышать осевые размеры собственно газовой турбины. При этом возникает серьезная проблема с обеспечением вибрационной надежности всего выхлопного тракта газовой турбины.

В ряде случаев уровень вибрации нагруженных стенок диффузоров достигает недопустимо высоких значений, вызывающих, в конечном счете, появление трещин на внешнем обводе диффузора и даже его разрушение.

В основе возникновения высоких динамических нагрузок на стенках диффузоров лежат чисто аэродинамические причины, обусловленные характером течения внутри проточной части диффузора.

Как показывают наши исследования [1] область наиболее интенсивной генерации пульсаций давления в движущихся жидких и газообразных средах, которые, в конечном счете, и определяют величину динамических нагрузок на стенки каналов, происходит в области изменения знака продольного градиента скорости. В диффузорах эта область располагается во входном сечении этих устройств, где конфузородное или безградиентное течение переходит в диффузорное течение.

Изменить существующую ситуацию можно либо путем прямой воздействия на характер течения рабочей среды, либо установкой вблизи внутренней поверхности внешнего обвода кольцевого диффузора специального аэродинамического демпфера, обеспечивающего гашение пульсаций давления только в пристеночной области течения.

Весьма эффективным способом воздействия на течение внутри диффузора является продольное ребрение внутренней поверхности его внешнего обвода. Суть такого ребрения состоит в установке вдоль

обтекаемой поверхности клиновидных ребер с расположением их вершин во входном сечении.

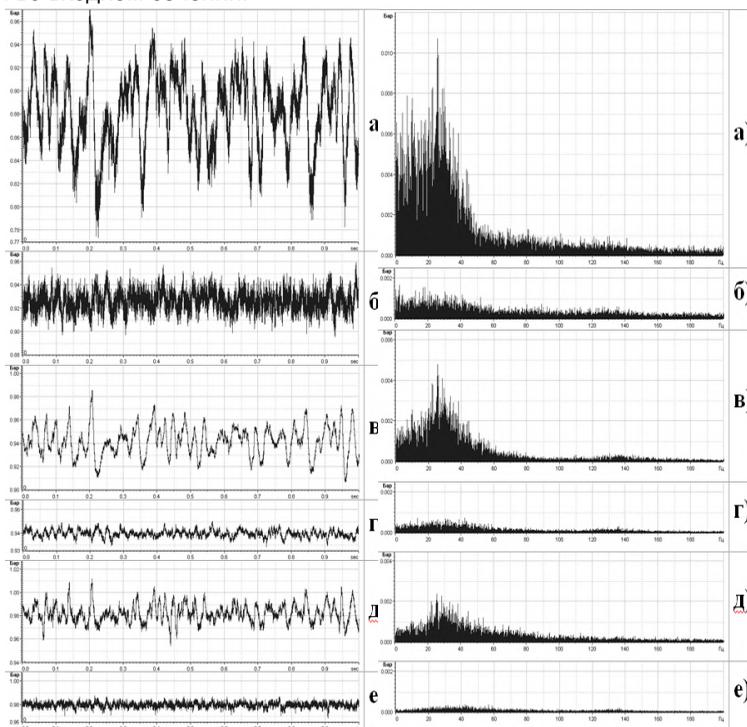


Рис. 1. Осциллограммы и спектрограммы пульсаций давления на стенке плоского 15° диффузора с гладкими стенками: а), в), д); с продольным оребрением: б), г), е), где а,б) на входе; в,г) 0,1L; д,е) 0,325L

Результаты исследования (более подробно в [2]) диффузора с продольными клиновидными ребрами и углом $\alpha=7^\circ$ показали, что при установке ребер происходит интенсивное снижение амплитуд пульсаций давления по всей проточной части диффузора.

Еще больший эффект был получен при продольном оребрении диффузора с учетом раскрытия $\alpha=15^\circ$ (рис.1). В этом случае амплитуда пульсаций давления снизилась до уровня характерного для диффузора с углом раскрытия $\alpha=7^\circ$. Поскольку коэффициент восстановления давления в сравниваемых диффузорах практически одинаков, то введение продольного оребрения не только позволяет серьезно снизить динамическую нагрузку на их стенки, но и существенно сократить осевую длину газотурбинных диффузоров. Отметим так же, что при установке ребер виброперемещение измеренное в среднем сечении диффузора, снизи-

лось примерно в 3 раза, а уровень шума на расстоянии 1 метра от исследованного диффузора уменьшился на 60%.

На заключительном этапе проведенных исследований рассматривалось влияние закрутки потока во входном сечении оребренного диффузора на его восстановительную способность. Здесь по сравнению с гладкими диффузорами при углах закрутки $\varphi=30^{\circ}$ коэффициент восстановления давления снизился всего на 5 – 6%.

Литература

1. **Зарянкин, А.Е.** О возможных путях повышения мощности, надежности и экономичности газотурбинных установок/ А.Е. Зарянкин, Е.Ю. Григорьев, Д.Е. Бузулуцкий, и др.// Вестник ИГЭУ, № 4. – 2014. – С.5 – 11.
2. **Зарянкин, А.Е.** Новый способ управления отрывом потока рабочих сред в широкоугольных диффузорах паровых и газовых турбин. А.Е. Зарянкин, А.Н. Парамонов, Е.Ю. Григорьев, и др.// Вестник ИГЭУ, № 5. – 2014. – С.5 – 10.

Григорьев Евгений Юрьевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: rvs@tren.ispu.ru

Хазов Павел Сергеевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: rvs@tren.ispu.ru

УДК 621.039

Г.В. РАЗОРЕНОВ, магистрант

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

Междисциплинарная основа в подготовке кадров для инжиниринговых компаний атомной отрасли

Аннотация. Статья посвящена вопросам подготовки кадров для инжиниринговых компаний атомной отрасли. Рассмотрена актуальность инжиниринга в современных условиях.

Ключевые слова: инжиниринг, атомная отрасль, подготовка кадров.

G.V. RAZORENOV, magistrant

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

The interdiscipline basis in specialists for atomic branch engineering companies training

Abstract. The article deals with the problems of the specialists' for atomic branch engineering companies training. The actuality of engineering under up-to-date conditions is considered.

Key words: engineering, atomic branch, specialists' training

На сегодняшний день Россия первая страна в мире, которая фактически провела глубокое реформирование научной и образовательной систем с нацеливанием её на междисциплинарность, на науку XXI века [1].

Инновационное развитие в энергетике формируется в процессе внедрения нового, конкурентоспособного оборудования, современных технологий при проектировании, строительстве и модернизации энергетических мощностей, разумном системном подходе к управлению этими процессами. В развитых странах в условиях рынка эту задачу успешно решают инжиниринговые компании.

Для инжиниринговых компаний атомной отрасли требуются специалисты, обладающие не только базовыми техническими знаниями, но и умеющие хорошо ориентироваться в дизайне, владеющие современными средствами проектирования и проектного управления. Система подготовки таких кадров должна быть создана на современном уровне, а именно, на междисциплинарной основе.

Инжиниринг в России является молодой сферой услуг. Наибольшую популярность в энергетике инжиниринг набрал в годы реформы ОАО РАО «ЕЭС России». Содержание этого термина до настоящего времени не определено законодательно, поэтому вызывает споры по вопросу входящих в него понятий.

Согласно определению, данному Европейской экономической комиссией ООН в 80-е гг. прошлого века, инжиниринг – это особая деятельность, связанная со строительством и эксплуатацией предприятий и объектов инфраструктуры. Другими словами, совокупность проектных и практических работ и услуг, относящихся к инженерно-технической области и необходимых для возведения объекта и содействия его эксплуатации.

Таким образом, инжиниринг находится между наукой и производством, формируя технологическую (в том числе техническую) базу производственной деятельности [2]. Ключевой задачей инжиниринга является обеспечение связей между наукой и производством, стимулируя внедрение инновационных разработок.

В отличие от российских инжиниринговых компаний, которые находятся на этапе становления, зарубежные инжиниринговые компании к настоящему моменту уже прошли длительный путь роста и развития, который российскому инжинирингу еще только предстоит пройти.

Например, американские инжиниринговые компании занимаются строительством промышленных и инфраструктурных объектов по всему миру еще с 50-х годов XX века. Среди российских компаний опытом реализации проектов на международном рынке обладают единицы – в основном в секторе строительства атомных станций.

Проектирование атомных станций осуществляют три инжиниринговые компании, созданные в 2007 году на базе трех проектных институтов «Атомэнергопроект» в Москве, Санкт-Петербурге и Нижнем Новгороде, которые оказывают услуги по проектированию, сооружению и выводу из эксплуатации атомных электростанций, как в России, так и за рубежом.

Потребность в кадрах для инжиниринговых компаний сформировалась за последние пять лет и вузы пока не совсем готовы предложить новые программы обучения таких специалистов.

Учитывая положительную динамику роста инжиниринговых услуг и повышение спроса на профессиональные инжиниринговые кадры в атомной отрасли, Минобрнауки РФ в 2010 году разработало и утвердило Федеральный государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования по направлению подготовки (специальности) 141403.65 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг». Необходимость введения федерального стандарта была вызвана новыми требованиями в подготовке специалистов для атомной энергетики. В первую очередь обращает на себя внимание в обозначении направления подготовки новый термин «инжиниринг». Что означает этот термин в образовательном стандарте?

Специалист по направлению подготовки (специальности) 141403.65 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» готовится к следующим видам профессиональной деятельности – научно-исследовательская, проектная, производственно-технологическая и организационно-управленческая.

Следует добавить, что развитие сферы инжиниринговых услуг в настоящее время тесно связано с использованием информационных моделей зданий и сооружений, так называемыми BIM-технологиями. Наибольшее развитие данный подход получил в инжиниринговых компаниях атомной отрасли, в освоении подобных моделей они вышли на лидирующие позиции в стране, что также необходимо учитывать при подготовке специалистов инжиниринга.

По итогам 2014 года деятельность в области инжиниринга резко активизировалась. Президентом России утвержден Федеральный закон Российской Федерации от 31 декабря 2014 г. N 488-ФЗ "О промышленной политике в Российской Федерации". В настоящее время в обсуждении находится проект закона об инжиниринге и инжиниринговой деятельности. В этом году продолжается реализация подпрограммы «Развитие инжиниринговой деятельности и промышленного дизайна». Основой для ее создания стало Постановление Правительства от 23 июля 2013 г. № 1300-р, а именно «дорожная карта» в области инжиниринга и промышленного дизайна. В качестве основных мероприятий подпрограммы следует отметить: стимулирование создания и развития инжиниринговых центров (ИЦ) на базе ведущих вузов и научных организаций, стимулирование спроса на услуги инжиниринговых центров при вузах и научных организациях. Имея официальный юридический статус, ИЦ может обеспечить официальное трудоустройство студентов, базу для прохождения учебной и преддипломной практики, а также работу по выбранной специализации.

Ивановский энергетический университет (ИГЭУ) входит в ассоциацию «Консорциум опорных вузов Госкорпорации «Росатом». Подготовка

кадров по специальности 141403.65 «Атомные станции: проектирование, монтаж, обслуживание и эксплуатация» реализуется на кафедре «Атомные электрические станции» (АЭС) с использованием современных инновационных технологий обучения. Наряду с традиционными видами учебных занятий в практике подготовки специалистов для атомной отрасли широко используются занятия в научно-образовательном центре (НОЦ): на полномасштабном и функционально-аналитическом тренажерах блока АЭС с реактором ВВЭР-1000. Они позволяют проводить обучение с максимальным приближением к реальным ситуациям на АЭС. Производственную и преддипломную практику студенты проходят на атомных станциях и предприятиях госкорпорации Росатом. Большое количество выпускных квалификационных работ посвящено актуальным вопросам эксплуатации и безопасности атомных станций и выполняются с использованием современных программных средств. Кафедра АЭС ИГЭУ участвует также в профессиональной переподготовке кадров для строящихся АЭС, в настоящее время здесь проходят переподготовку специалисты Белорусской АЭС по направлению «Эксплуатация АЭС».

С 2013 года в АО «НИАЭП» (г. Нижний Новгород) создана и работает базовая кафедра Нижегородского государственного технического университета (НГТУ) «Системы управления жизненным циклом сложных инженерных объектов». Таким образом, инженеринговая компания госкорпорации «Росатом» передает свои знания и уникальные компетенции молодому поколению.

Выводы. Профильные Вузы и кафедры могут не только готовить специалистов для атомной отрасли на междисциплинарной основе, но и проводить обучение по повышению квалификации сотрудников инженеринговых компаний и проектных организаций атомной отрасли, для этого необходимо взаимодействие с инженеринговыми компаниями и государственная поддержка в обновлении лабораторной базы вузов.

Литература

1. Ковальчук М.В. Конвергенция наук и технологий – прорыв в будущее. [Электронный ресурс] - режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=5852>
2. Осика Л. Современный инженеринг: определение и предметная область // Профессиональный журнал, 2010, № 04(76), С. 10-21.

Разоренов Григорий Валентинович

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: razorenov_g@mail.ru

УДК 621.539

А.Г. ИЛЬЧЕНКО, к.т.н., доцент,
А.Е. ТИХОНОВ, студент

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

Повышение безопасности АЭС с ВВЭР-1000 путем применения дополнительных аварийных питательных насосов с паротурбинным приводом

Аннотация. Предложено для обеспечения подачи питательной воды в парогенераторы энергоблока с ВВЭР-1000 в режимах полного обесточивания с отказом резервных дизель-генераторов использовать дополнительные аварийные питательные насосы с паротурбинным приводом. Паротурбинные приводы работают на сбросном паре парогенераторов, который генерируется в них во время расхолаживания. Приведены результаты расчетов приводных турбин и работы системы в режиме расхолаживания.

Ключевые слова: энергоблок АЭС, обесточивание, расхолаживание, аварийный питательный насос, турбопривод.

A.G. ILCHENKO, Candidate of Engineering, docent,
A.E. TICKONOV, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: agi@aes.ispu.ru*

Nuclear Power Plant safety upgrading with VVER-1000 using additional emergency feeding pumps with the steam-turbine gear

Abstract. It is proposed for feed water providing into steam-generators of Power Unit with VVER- 1000 in the regimes of full reserved diesel-generators to use additional emergency feed pumps with the steam-turbine gear. Steam-turbine gears work on steam-generators' breaking steam, which is generating in them during the cooling. The results of calculations of gear turbines and the process of the system in the cooling regime are given in the article.

Keywords: NPP Power Unit, cooling, emergency feed pump, current loss, turbine gear.

Крупная радиационная авария на АЭС «Фукусима-1», произошедшая 11 марта 2011 года в Японии, заставила критически пересмотреть многие технические решения по обеспечению безопасности АЭС. Если рассмотреть картину аварии детально, то можно увидеть один немаловажный фактор, в корне повлиявший на развитие аварийной ситуации и ее последствия. Это недостаточная развитость систем аварийной защиты самой АЭС, а именно систем аварийного электропитания, используемых для питания насосов, подающих воду в реак-

торы для проведения расхолаживания. В результате этого, после того как дизель-генераторы системы надежного электроснабжения оказались уничтожены цунами, подача воды в реактор для его расхолаживания оказалась невозможной.

Одним из способов повысить надежность работы АЭС в условиях полного обесточивания является применение пассивных систем расхолаживания, не требующих для своей работы внешних источников энергии. Необходимо отметить, что в настоящее время работы во всем мире ведутся работы по разработке подобных систем.

В отечественных проектах АЭС с реакторами нового поколения (проект АЭС-2006) запроектированы пассивные системы отвода тепла, что делает возникновение и развитие аварий по типу «Фукусима» чрезвычайно маловероятной. Однако на действующих АЭС подобные системы отсутствуют. Одним из способов повышения безопасности действующих АЭС с ВВЭР, может являться применение дополнительных систем подачи аварийной питательной воды в парогенераторы, действующих по пассивному принципу или имеющих независимые от системы надежного электроснабжения источники энергии. В частности, могут применяться дополнительные насосы подачи аварийной питательной воды с газотурбинным или паротурбинным приводом, паровые поршневые насосы, пароводяные инжекторы и т.д.

В данной работе представлен вариант модернизации аварийного питания парогенераторов (АПВ) серийных блоков АЭС с ВВЭР-1000 с помощью дополнительных аварийных питательных насосов с турбоприводом (АТПН), включенных параллельно основным аварийным питательным электронасосам (АПЭН). Система АПВ предназначена для компенсации потери рабочего тела второго контура при ведении режима аварийного расхолаживания через БРУ-А в атмосферу. Паротурбинные приводы дополнительных насосов работают на сбросном паре парогенераторов, который генерируется в них во время расхолаживания (за счет остаточного энерговыделения реактора).

При незапуске или отказе работающего дизель-генератора системы надежного электроснабжения, открывается клапан подачи пара на паропроводе из парогенератора и пар подается на АТПН. Требуемый расход пара на АТПН устанавливается изменением степени открытия регулирующего клапана перед приводной турбиной. При скорости расхолаживания энергоблока 30°С/час температура в 150 °С, при которой заканчивается режим пароводяного расхолаживания, достигается примерно за 4,5 часа. При этом давление в парогенераторе достигает величины примерно 0,47 МПа, что вполне достаточно для работы системы.

В качестве турбопривода дополнительного аварийного питательного насоса типа ЦН 150-90 предлагается использовать одноступенчатую противодавленческую турбину мощностью 800 кВт. Выхлоп отработавшего пара производится в атмосферу.

Таблица 1. Результаты расчета переменного режима турбины с начальным давлением 6 бар в режиме расхолаживания со скоростью 30 °С/ч

Врем, мин	$P_{пг}$, МПа	Q , МВт	$\Delta P_{нас1}$, МПа	$N_{нас1}$, кВт	$N_{тур1}$, кВт	$G_{тур1}$, кг/с	$P_{т1}$, МПа	H_0 , кДж/кг	η_0
1	6,37	94,66	6,51	822,3	856,5	7,45	0,77	128,6	0,858
30	5,08	51,44	5,23	358,5	373,5	5,79	0,61	84,4	0,733
60	3,97	45,7	4,12	250,9	261,3	5,34	0,56	70,3	0,669
90	3,06	42,7	3,21	182,6	190,2	5,02	0,53	59,7	0,608
120	2,32	40,7	2,47	133,9	139,5	4,78	0,51	51,3	0,546
150	1,72	39,2	1,87	97,7	101,7	4,58	0,49	44,3	0,481
180	1,25	38,08	1,4	71,2	74,2	4,43	0,475	38,5	0,414
210	0,89	37,14	1,04	51,4	53,5	4,31	0,463	33,9	0,351
240	0,62	36,35	0,77	37,2	38,7	4,22	0,454	30,1	0,287
260	0,47	35,89	0,62	29,14	31,1	4,17	0,449	28,3	0,252

Рассмотрены вариант исполнения одноступенчатой приводной турбины с одно и двухвенечными регулирующими ступенями.

Проведены предварительный и детальный расчеты турбин на номинальный режим для вариантов с начальным давлением соответственно: 10 бар; 8,5 бар; 7,5 бар; 6 бар. Также были проведены расчеты режимов расхолаживания для скоростей 30 и 60 °С/ч. Результаты для одного из вариантов приведены в табл. 1.

По результатам расчета вероятность невыполнения функции (ВНФ) одного канала модернизированной системы аварийного питания парогенераторов составила 0,0231. Это позволяет сделать вывод, что внедрение привода повышает надежность системы при ИС «Полное обесточивание», по сравнению с системой АПВ только с электроприводом.

Литература

1. **Аварийный** режим полного обесточивая АЭС (за рубежом) / А.С. Пилев [и др.] – ЦНИИАтоминформ, 1988. – 40 с.
2. **Вероятностный** анализ безопасности атомных станций. Методика расчета показателей надежности систем безопасности АЭС (ВАБ-0) на примере САОЗ НД ВВЭР-1000: Учеб. пособие / А.Ю. Токов, В.С. Каекин; – Иваново: ИГЭУ, 1996. – 48 с.

Ильченко Александр Георгиевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: agi@aes.ispu.ru

Тихонов Алексей Евгеньевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: grindekk@mail.ru

УДК 620.9:004.896

В.А. ГОРБУНОВ, д.т.н., доцент
Н.А. ЛОНШАКОВ, инженер, В.А. ДУНАЕВ, студент

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

Повышение эффективности работы тепломеханического оборудования АЭС с использованием нейросетевых технологий

Аннотация. В данной статье рассматриваются проблемы поиска путей повышения эффективности эксплуатации тепломеханического оборудования на основе анализа режимов работы оборудования АЭС и определение технически обоснованных норм расхода энергии. Для проведения анализа и повышение эффективности работы оборудования рассматривается технология, основанная на нейросетевом моделировании. Приведена возможность использования технологии на примере одного из турбопитательных насосов блока № 2 Калининской АЭС.

Ключевые слова: турбопитательный насос, эффективность, анализ, нейросетевые технологии, эксплуатация энергоблока, параметры работы, нормы расхода тепловой энергии.

V.A. GORBYNOV, Doctor of Engineering, docent,
N.A. LONSHAKOV, Engineer training laboratory,
V.A. DUNAIEV, Student

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

Improving the efficiency of thermal and mechanical equipment NPP using neural network technologies

Abstract. This article discusses the problem of finding ways to improve the operational efficiency of thermal and mechanical equipment on the basis of the analysis of modes of NPP equipment and determination of technically based rate of use energy. For analyze and improve the performance of the equipment is considered a technology based on neural network modeling. The possible of the use of technology as an example of one of the turbine drive feed water pumps block number 2 of Kalinin NPP.

Key words: turbine drive feed water pump, efficiency, analysis, neural network technology, operation of power generating unit, operating parameters, rate of use heat energy.

Вопрос о повышении эффективности эксплуатации оборудования тепловых и атомных станций является одним из наиболее актуальных вопросов, стоящих перед эксплуатирующими организациями. В связи с этим концерном ОАО «Росэнергоатом» была создана и внедрена система энергетического менеджмента, отвечающая требованиям

международного стандарта ISO 50001:2011 «Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению» [1].

Исходя из вышеизложенной тенденции, целью работы является создание инновационного инструмента, предназначенного для оценки эффективности эксплуатации тепломеханического оборудования паротурбинных установок атомных станций.

Основой данного инструмента является нейросетевая технология, которая позволяет:

- на основе теплотехнологических параметров, полученных непосредственно в процессе эксплуатации энергоблока, смоделировать процесс работы выбранного узла или паротурбинной установки в целом;
- качественно и количественно спрогнозировать изменения выходных параметров модели (мощности, коэффициента полезного действия) от изменения входных параметров, построить режимные карты работы оборудования;
- выявить элементы агрегатов и узлов, наиболее подверженных износу во время эксплуатации, оценить изменение эффективности работы оборудования после проведения модернизаций и ремонтов.

Апробация нейросетевого моделирования была успешно проведена в ИГЭУ для создания модели газовой утилизационной бескомпрессорной турбины (ГУБТ-25), ОАО «Северосталь» и паровой турбины ПТ-12-34/10 М, «Калужский турбинный завод».

В настоящее время ведется работа по созданию эффективной нейросетевой модели питательного турбонасосного агрегата (ТПН), установленного на втором блоке Калининской АЭС. Принципиальная схема агрегата приведена на рисунке.

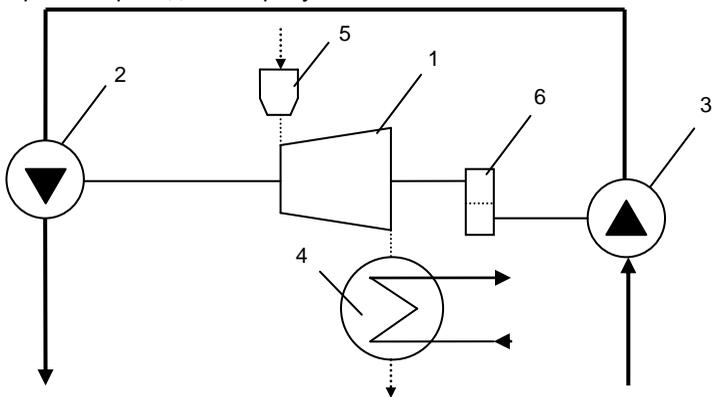


Рис. Питательный турбонасосный агрегат:

- 1 - паровая турбина ОК-12А; 2 - главный питательный насос ПТ-3750-75;
- 3 - предвключенный насос 400-QND-spec; 4 - конденсатор турбины;
- 5 - стопорно-регулирующий клапан; 6 - редуктор Р2

В состав агрегата входят:

- паровая турбина ОК-12А «Калужский турбинный завод», номинальной мощностью 11680 кВт;
- главный питательный насос ПТ-3750-75 с номинальной подачей питательной воды 1,04 м³/с (3760 м³/ч), напором 8,24 МПа (80,8 кгс/см²);
- предвключенный (бустерный) насос 400-QHD-спес с номинальной подачей питательной воды 1,05 м³/с (3800 м³/ч), напором 2,19 МПа (21,5 кгс/см²);
- редуктор Р-2, эжектор основной Э0-50, эжектор пусковой ЭП-150/П и другое оборудование.

Был получен ряд значений основных параметров работы питательного турбонасосного агрегата (табл.).

Таблица. **Параметры работы ТПН**

Наименование параметра	Диапазон изменения
Давление питательной воды на входе в бустерный насос, МПа (кгс/см ²)	0,85—0,92 (8,35—9,09)
Давление питательной воды на входе в главный питательный насос, МПа (кгс/см ²)	2,38—3,56 (23,34—34,92)
Давление питательной воды на выходе из главного питательного насоса, МПа (кгс/см ²)	7,39—8,69 (72,5—85,25)
Расход питательной воды за питательным турбонасосным агрегатом, кг/с (т/ч)	433,3—952,2 (1560—3428)
Температура питательной воды за питательным турбонасосным агрегатом, °С	161,8—165
Расход пара на приводную турбину, кг/с (т/ч)	12,1—20 (43,6—72)
Температура пара перед главной паровой задвижкой, °С	174—229,2
Давление пара перед стопорным клапаном, МПа (кгс/см ²)	0,80—0,94 (7,86—9,2)
Давление пара за регулирующим клапаном, МПа (кгс/см ²)	0,34—0,62 (3,34—6,08)
Температура пара на выходе из приводной турбины, °С	26,4—43
Вакуум в конденсаторе приводной турбины, МПа (кгс/см ²)	-0,089—-0,1 (-0,88—-1)
Температура пара в конденсаторе приводной турбины, °С	18,2—41,3
Температура охлаждающей воды на входе в конденсатор приводной турбины, °С	6,0—31,2
Температура охлаждающей воды на выходе из конденсатора приводной турбины, °С	11,7—37,5

Снятие значения параметров производилось в период с 1.01.2014 по 31.12.2014, интервал между замерами составлял 2 часа.

На основе полученных данных была рассчитана эффективность работы питательного турбонасосного агрегата, как отношение энергии,

полученной питательной водой к полной тепловой энергии, подводимой к приводной турбине с учетом потерь тепловой энергии в конденсаторе. Значение эффективности работы ТПН, за данный промежуток времени, варьировалось от 9,81% до 16,03%.

Применение качественно обученной нейросетевой модели позволяет разработать режимные карты по эксплуатации оборудования и определить технические обоснованные нормы расхода тепловой энергии рабочего тела на перекачку одной тонны питательной воды в секунду.

Литература

1. **Приложение** №2 к приказу ОАО «Концерн Росэнергоатом» от 15.11.2013 г. № 9/1055-П «Стратегические цели и цели в области энергоэффективности на среднесрочную перспективу».
2. **Горбунов В.А.** Использование нейросетевых технологий для повышения энергетической эффективности теплотехнологических установок / ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2011. – 475 с.

Горбунов Владимир Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: gorbynov.w@mail.ru

Лоншаков Никита Андреевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: nik-lon@mail.ru

Дунаев Владислав Андреевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: andrejd6767@mail.ru

УДК 621.039.51

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

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

Применение тренажеров-имитаторов энергоблока АЭС для симуляции реакторных измерений

Аннотация. Разработаны программы и методики симуляции нейтронно-физических экспериментов. Симуляция технологических процессов проводится на компьютерном и полномасштабном тренажерах энергетического блока АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР-1000, подготовка персонала, аналитические тренажеры, полномасштабные тренажеры, нейтронно-физические измерения.

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

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

Usage of NPP simulators to simulate reactor measurements

Abstract. The complex of programs and methods of simulating neutronic experiments are designed. Technological process simulation is carried out on computer and full-scale simulators of nuclear power plants generating units with water-cooled reactor WWER-1000.

Key words: nuclear power plant, water-cooled power reactor, personnel training, analytical simulators, full-scale simulators, neutronic measurements.

Безопасный пуск и последующая эксплуатация ядерного реактора возможны только при знании его нейтронно-физических характеристик с точностью, удовлетворяющей требованиям правил ядерной безопасности и теплотехнической надежности активной зоны. Экспериментальное определение характеристик реакторов осуществляется как при вводе в эксплуатацию новых, так и после очередной перегрузки топлива действующих энергоблоков АЭС. Цель таких исследований – экспериментальное подтверждение безопасности эксплуатации реакторной установки, правильности выполненных нейтронно-физических расчетов, а также получение экспериментальных данных для корректировки констант и компьютерных программ, используемых для расчетного моделирования топливных циклов при проектировании и эксплуатации. При этом большинство важных характеристик реактора не может быть получено прямыми измерениями, для их определения используют косвенные измерения и различные методики. В их основе лежит математическая обработка результатов экспериментов. Овладение техникой физического эксперимента и его обработки является одной из важнейших задач при подготовке специалистов. Для ее решения в стенах вуза актуальным представляется использование в учебном процессе компьютерных тренажеров-имитаторов энергоблока.

В настоящее время в учебно-тренировочных центрах отечественных станций нашей страны создан современный парк программно-технических средств обучения, среди которых полномасштабные, аналитические и многофункциональные тренажеры. Постепенно тренажерные комплексы внедряются и в вузовскую подготовку, однако этот процесс требует разработки соответствующего методического обеспечения, учитывающего особенности использования тренажеров именно для студентов.

Нами разработаны и внедрены методика и программы по симуляции реакторных измерений. В основу разработанного комплекса симуляции реакторных физических экспериментов положены существующие руководящие документы (РД) [1, 2], адаптированные для

имитаторов. Эти документы устанавливают объем, методики и порядок проведения физических экспериментов (алгоритмы выполнения операций) в целях определения нейтронно-физических характеристик ядерного энергетического реактора, требования к исходному состоянию реакторной установки перед началом конкретного эксперимента, технические ограничения и меры по обеспечению ядерной безопасности, действия персонала в случае изменения состояния реактора, необходимого для проведения работ, а также критерии успешности и контроль правильности выполнения экспериментальных исследований. В качестве имитаторов используются Функционально-аналитический тренажер (ФАТ) и полномасштабный тренажер (ПМТ) энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000 (В-320). На ближайшие 20–30 лет основным типом атомных энергетических установок по оценкам экспертов будут являться именно установки на тепловых нейтронах с водо-водяными атомными реакторами ВВЭР.

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. ФАТ реализован на персональном компьютере в программной среде 3KeyMaster™ [3], программный продукт ООО «Вестерн Сервисез». Широкие возможности ФАТ 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 ФАТ в учебном процессе. Среди возможностей ФАТ, необходимых для успешного проведения экспериментов, можно отметить:

- возможность загрузки заранее заданного оперативного состояния блока и сохранения текущего оперативного состояния с его загрузкой при необходимости;
- возможность замедления/ускорения текущего времени при рассмотрении быстротекущих/длительных процессов;
- возможность снятия графиков зависимостей различных параметров от времени, в том числе с изменением шага по времени при фиксации параметров;
- возможность сохранения экспериментальных данных в цифровой форме.

ПМТ имеет идентичное программное обеспечение в дополнении к полномасштабной модели реального блочного щита управления. Он обеспечивает моделирование в реальном масштабе времени всех режимов эксплуатации АЭС и также позволяет симулировать физические эксперименты.

Кроме того, тренажерная подготовка является очень мощным инструментом по формированию профессиональных компетенций будущего специалиста.

Каждая лабораторная работа по реакторным измерениям включает теоретический раздел; экспериментальную часть, содержащую адаптированные к компьютерным имитаторам существующие методики нейтронно-физических измерений; практическую часть, представляющую собой программы и методики обработки результатов.

В круг разработанных вопросов входят следующие эксперименты:

- моделирование работы реактиметра на ФАТ;
- определение температурного, барометрического и плотностного коэффициентов реактивности на минимально контролируемом уровне мощности реактора, на энергетических уровнях мощности реактора;
- определение дифференциальных и интегральных эффективностей групп органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) и коэффициента реактивности по концентрации борной кислоты в реакторе на минимально контролируемом уровне мощности;
- определение эффективности аварийной защиты реактора и эффективности наиболее эффективного ОР СУЗ;
- определение мощностного коэффициента и мощностного эффекта реактивности при увеличении мощности реактора от минимально контролируемого уровня до одного процента номинальной величины.

В ходе выполнения каждой из работ обучаемый производит соответствующие воздействия на имитируемые органы управления, контролирует протекание процессов. Обработка результатов проводится на основе сохраненных в графическом или цифровом виде экспериментальных данных.

Рассчитанные характеристики (коэффициенты и эффекты реактивности, дифференциальные и интегральные характеристики поглотителей и пр.) далее используются в численных экспериментах при математическом моделировании различных переходных процессов, ход которых сравнивается с результатами экспериментов на имитаторе энергоблока.

Интенсивное развитие и продление сроков эксплуатации объектов атомной энергетики, проблема обеспечения безопасности этих объектов определяют всевозрастающую потребность в высококвалифицированном персонале. Вузы должны удовлетворять потребности отрасли в выпускниках и уровне их подготовки, в том числе за счет внедрения современных технических средств обучения. Разработаны методика и программы по симуляции нейтронно-физических реакторных измерений с использованием аналитического и полномасштабного тренажера энергоблока АЭС с реактором ВВЭР-1000. Они рассматриваются как часть единого обучающего комплекса, направленного на интенсификацию вузовской подготовки будущего оперативного персонала и позволяющего сократить сроки их адаптации на рабочих местах.

Литература

1. **Методики** расчета нейтронно-физических характеристик по данным физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000: Руководящий документ РД ЭО 0151-2004 / Концерн «Росэнергоатом». – М., 2005. – 101 с.
2. **Типовые** программы и методики проведения физических экспериментов на энергоблоках атомных электростанций с реакторами ВВЭР-1000: Руководящий документ РД ЭО 0150-2004 / Концерн «Росэнергоатом». – М., 2005. – 273 с.
3. **Western Services Corporation** [официальный сайт]. – URL: <http://www.ws-corp.com>.

Семенов Владимир Константинович

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: semenov_vk@mail.ru

Вольман Мария Андреевна

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: maria_volman@mail.ru

УДК 621.311.26

А.Г. ИЛЬЧЕНКО, к.т.н., доцент,
М.А. БУГРОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: agi@aes.ispu.ru, mishanya_555@mail.ru

Использование парогазовых технологий на АЭС с ВВЭР

Аннотация. Разработаны схемы интегрирования газотурбинной установки в технологическую схему энергоблока с ВВЭР-1000 и проведен их анализ. Проведены расчеты тепловой экономичности и определен срок окупаемости рассматриваемых вариантов.

Ключевые слова: ВВЭР-1000, газотурбинная установка, промперегрев, тепловая экономичность.

A.G. ILCHENKO, Candidate of Engineering, docent,
M.A. BUGROV, graduate

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

The steam-gas technologies usage at Nuclear Power Plant with VVER type of reactors

Abstract. The diagrams of gas-turbine installation's integration into technological outline of the Power Unit with VVER-1000 were designed and their analysis was completed. The heat economy calculations were made and the compensation period of outlined variants has been stated.

Keywords: VVER-1000, gas-turbine installation, industrial overheating, heat economy.

В настоящей работе приведены некоторые результаты исследования применения газотурбинных установок на АЭС с ВВЭР -1000. Рассматривались вопросы разработки принципиальных схем включения газовых турбин в тепловую схему энергоблока АЭС, определение экономичности и эффективности внедрения предложенных технических решений, выбор технологического оборудования гибридных установок.

Современные газотурбинные установки экономичны, маневренны, достаточно компактны. Их недостатком является высокая температура выхлопных газов, которая составляет 600-700 °С. Уходящие продукты сгорания выбрасываются в атмосферу, тем самым ухудшая экологическую обстановку, теряя при этом потенциальное топливо. Имеющийся положительный опыт совмещения газового и парового цикла на ТЭС с утилизацией теплоты уходящих газов газотурбинного агрегата в тепловой схеме паровой турбины показывает обоснованность таких разработок. Включение в работу газовой турбины параллельно с паровой будет способствовать не только получению дополнительной мощности на АЭС, но и увеличению тепловой экономичности всего энергоблока.

Нами проводился анализ тепловой экономичности использования газотурбинной установки в составе тепловой схемы ПТУ К-1000-60/3000 энергоблока с ВВЭР-1000. Рассматривались варианты с использованием теплоты уходящих газов газовой турбины для организации промежуточного перегрева пара в газопаровом теплообменнике (вместо паропарового перегревателя) и вариант с замещением регенеративных подогревателей высокого давления газо-водяным теплообменником. При этом температуры промежуточного перегрева и питательной воды сохранялись на проектном уровне: 250 и 217 °С соответственно. Анализ рынка предлагаемых газотурбинных установок показал, что для условий турбоустановки К-1000-60/3000 наиболее подходят установки Ansaldo V94.2K (производство компании Siemens) и Mitsubishi M701F4, имеющие общие показатели, приведенные в табл. 1.

Из указанных выше ГТУ для использования с системой промежуточного газопарового перегрева может быть рекомендована газовая турбина AnsaldoV94.2K.

Таблица 1. Сравнительные характеристики ГТУ

Величина	Тип ГТУ			
	Mitsubishi M701F4		Ansaldo V94.2K	
	<i>Зима</i>	<i>Лето</i>	<i>Зима</i>	<i>Лето</i>
Тепловая мощность КС, МВт	819,5	774,6	521,3	509,8
Расход на газовую турбину, кг/с	762,5	716,0	577,8	540,0
Температура газа перед турбиной, °С	1350	1350	1060	1060
Температура газа за турбиной, °С	582,5	597	517,8	545
Электрическая мощность ГТУ, МВт	330,9	304,4	192,2	186,1
КПД, %	40,38	39,30	36,87	36,50

При замене паро-парового перегревателя на газопаровой электрическая мощность ПТУ увеличивается до ~ 1171 МВт. Суммарная электрическая мощность блока ($N_{\Sigma} = N_{III} + N_{IT}$) составит 1539,5 МВт в летнее время.

КПД по выработке электроэнергии ($\eta_{\Sigma} = \frac{N_{\Sigma}}{Q_{\Sigma}}$) составит 38,47 %.

В табл. 2 приведены некоторые результаты расчетов экономичности парогазового блока с ВВЭР-1000.

Таким образом, использование парогазовых технологий на АЭС позволит получить значительное увеличение мощности, что в целом повышает эффективность парогазовых АЭС. При работе паровой турбины на номинальных параметрах, замена ПВД на газодводяной подогреватель позволяет получить большую мощность паровой турбины. Однако необходимо провести анализ работы последних ступеней ЦНД паровой турбины в этих режимах.

Таблица 2. Оценка экономической эффективности парогазовых АЭС с ГТУ

Величина	АЭС с ВВЭР-1000	Парогазовая АЭС с ГТУ		
		1. MitsubishiM7 01F4	2. AnsaldoV94. 2K	2*. 2xAlstomGT 13E2
Эл.мощность, МВт	1012,5	1414	1279	1540
Стоимость строительства, млн руб	130 000	140 500	136 350	142 300
Годовая выработка электроэнергии, млн кВт*ч/год	7 590	10 620	9 600	11 560
Стоимость вырабатываемой электроэнергии, руб/(кВт*ч)	1,00	1,067	1,045	1,072
Стоимость природного газа, млн руб./год	-	955	620	1 210
Чистая годовая прибыль, млн руб./год	7 590	10 375	9 410	11 180
Срок окупаемости, лет	17,13	13,54	14,49	12,73

В то же время, схема с газопаровым перегревателем более перспективна. Так, при увеличении температуры за перегревателем до 350°С мощность паровой турбины увеличивается на 15%. Однако переход на повышенные температуры требует применения более жаропрочных лопаток первых ступеней.

Организация дополнительного газового цикла на АЭС может быть реализована как на действующих энергоблоках путём проведения реконструкции тепловой схемы 2-го контура, так и на строящихся и проектируемых станциях. Выбор оптимального режима работы газотур-

бинных установок, интегрированных в тепловую схему блока, представляет самостоятельную оптимизационную задачу и должен решаться с учетом структуры генерирующих мощностей энергосистемы и режимов энергопотребления в каждом конкретном случае.

Следует отметить, что газовый турбогенератор при вводе в эксплуатацию АЭС и в режимах пуска энергоблока может быть использован как альтернатива для замены пуско-резервной котельной. Установка газовых турбогенераторов позволит повысить надёжность и безопасность станции, так как может служить источником электроэнергии и тепла, в том числе и в режиме полного обесточивания АЭС. Топливом ГТУ является природный газ, при этом затраты в топливное хозяйство относительно невелики. Учитывая вышеизложенное, а также компактность, малую металлоемкость и быструю окупаемость ГТУ, их использование совместно с ядерным энергоблоком представляется весьма привлекательным, что особенно может быть реализовано при проектировании новых АЭС.

Литература

1. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учебное пособие для вузов/Под ред. С.В.Цанева – М.: Издательство МЭИ, 2002 – 584 с.
2. **Тепловые и атомные электрические станции:** Справочник / Под. общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 608 с.: (Теплоэнергетика и теплотехника; Кн. 3).
3. **Каталог** газотурбинного оборудования, 2008.

Ильченко Александр Георгиевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: agi@aes.ispu.ru
Бугров Михаил Андреевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: mishanya@mail.ru

УДК 681.515

А.В. КОНДРАШИН, к.т.н., профессор

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

О состоянии процессов внедрения АСУ ТП на ТЭС и о перспективах развития на базе современных ПТК

Аннотация. В основу аналитического обзора положены успехи отечественных фирм-производителей программно-технических комплексов, завоевавших признание в энергетике России. Отмечены проблемы, сдерживающие прогресс в развитии АСУ ТП. Предложены приоритетные направления функционального совершенствования АСУ ТП.

Ключевые слова: функции АСУ ТП, программно-технические комплексы, эффективность.

A.V. KONDRASHIN Candidate of Engineering, professor,

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

On the status of implementation of APCS on TPS and the prospects of their development on the basis of modern PTC

Abstract. The basis of analytical review based on the success of domestic manufacturers of PTC, who was recognized in the Russian energy sector. Noted issues, that are impeding progress in the development of APCS. Proposed priority areas for functional improvement APCS

Key words: the functions of APCS, program-technical complexes.

В основу аналитического обзора положены успехи отечественных фирм-производителей программно-технических комплексов (ПТК), завоевавших в последнее время признание среди предприятий теплоэнергетической отрасли России, в том числе группа компаний «Текон», ЗАО «Модульные Системы Торнадо» и НПФ «Круг». Разработкой и внедрением АСУ ТП кроме фирм-производителей ПТК занимаются также ООО «Энергоавтоматика» и ООО «Ивэлектроналадка». Общий объём внедрений отечественных ПТК в последние годы значительно возрос, а их доля превзошла 50 %, отодвигая ПТК зарубежных производителей (Siemens, Emerson, ABB и др.). Это позволяет создавать системы, в максимальной степени учитывающие специфику отечественного оборудования, условия его эксплуатации и квалификацию обслуживающего персонала.

Особое значение приобретают аспекты безопасности АСУ ТП, их защищённости от несанкционированных действий извне. Кроме того принципиально важно, что в процессе разработки используется опыт специалистов ведущих отечественных компаний, занимавшихся созданием подобных систем в прежние годы. Известно, что уровень технических решений, достигнутый при создании крупномасштабных систем управления в отечественной теплоэнергетике, во многом превосходит уровень зарубежных разработок.

Вследствие относительно малого объёма вновь вводимого в эксплуатацию генерирующего оборудования главным направлением во внедрении АСУ ТП является модернизация систем автоматики действующих ТЭС. Ограниченные финансовые возможности генерирующих компаний, эксплуатирующих старое оборудование, оказывает значительное влияние на функциональное наполнение новых АСУ ТП. Уместно заметить, что часто вводимые в эксплуатацию системы, называются именно АСУ ТП, хотя при внимательном подходе к терминологической оценке возможностей их следовало считать подсистемами несуществующей во многих случаях полномасштабной АСУ ТП. Наибо-

лее внедряемыми являются системы автоматического управления газовыми горелками (САУГ), системы управления водогрейными котлами, системы технологического контроля турбоустановок и т.п.

Лоскутная технология модернизации сдерживает внедрение наиболее эффективных комплексных решений. Анализ внедряемых разработок позволяет сделать следующие выводы:

1) Практически полностью средствами ПТК реализуются традиционные задачи управления основными теплоэнергетическими процессами на ТЭС (ПТК используются для замещения морально и технически устаревших средств автоматизации). Это снижает эксплуатационные расходы на автоматику, а главное - обеспечивает существенное повышение надёжности самих систем управления и снижает вероятность отказов оборудования по вине автоматики. Но доля отказов этого типа значительно меньше отказов чисто технологического характера. И поэтому фактический эффект ниже ожидаемого.

2) Расширение объёмов замещения старых средств автоматизации вспомогательного оборудования мощными ПТК не относится к категории априори эффективных мероприятий, т.к. для этого класса задач управления более предпочтительны относительно простые контроллеры, которые допускают встраивание в местные шкафы и щиты управления (при этом значительно сокращаются расходы на кабельную продукцию). Не исключено, что при разработке и внедрении полномасштабных АСУ ТП реализация и задач управления вспомогательным оборудованием на ПТК не будет убыточной.

3) Функциональный уровень разрабатываемых и внедряемых в порядке модернизации АСУ ТП на действующем оборудовании находится в стадии стагнации. Заказчик исходит из необходимости лишь ликвидировать последствия старения автоматики и слабо представляет перспективы развития систем.

4) Разработчика АСУ ТП, в свою очередь, также мирятся с клонированием готовых наработок (так проще, быстрее и никакого риска). Количество наработок, перешедших в категорию типовых, явно доминирует в общем объёме внедрений.

Существенного эффекта от внедрения ПТК можно добиться, лишь перешагнув границы традиционного, того, что принято считать типовым. Это касается и самих задач автоматизации и способов их решения. Отметим некоторые возможные направления:

1) Оперативная (online) техническая диагностика состояния оборудования, позволяющая осуществлять прогноз необратимых изменений в самом оборудовании. Это может не только предотвратить отказ оборудования, но будет способствовать расширению межремонтных периодов. Это обеспечит в конечном счёте снижение как эксплуатационных расходов (за счёт снижения непроизводительных затрат топлива на операции аварийного останова, последующего пуска и вынужденного перераспределения нагрузок), так и капитальных затрат на ремонт

оборудования. Реализация функций оперативной диагностики относится к категории технически реализуемых задач.

2) Оперативная (online) функциональная диагностика, преследующая цель определения текущих технико-экономических характеристик, зависящих как от технического состояния оборудования (например, от регулировочных диапазонов дымососов и дутьевых вентиляторов, от присосов в конденсаторах турбин и т.п.), а также от изменяющихся условий эксплуатации (графика нагрузки, видов топлива и т.п.). Оценка (расчёт) в реальном времени таких характеристик позволит фактически получить реальные характеристики оборудования. Их сравнение с нормируемыми (типовыми) характеристиками позволит не только выявить факт отклонения, но и диагностировать причину изменений. Это может быть использовано как для оперативной (автоматической) коррекции режимных карт, так и для оценки прогнозируемого периода до капитального ремонта, преследующего цель устранения эффекта старения оборудования. Этот тип задач достаточно хорошо проработан, опирается на утверждённые алгоритмы расчёта ТЭП и не имеет препятствий к внедрению.

3) Диагностика состояния регулирующей арматуры, используемой в системах автоматического регулирования. Неблагоприятными факторами в процессе эксплуатации исполнительных устройств является появление люфтов в сочленениях и выбега исполнительных механизмов. Оба эти фактора могут привести фактически к полному отказу системы регулирования. Кроме того, значительная часть регулирующей арматуры обладает неблагоприятными характеристиками, ограничивающими диапазон управления с необходимым запасом устойчивости. Всё это в совокупности существенно сказывается на качестве управления, а в конечном счёте приводит к ограничению регулировочных диапазонов, к увеличению удельного расхода топлива и снижению надёжности основного оборудования.

4) Адаптивное управление технологическими процессами. Обеспечивает автоматическую подстройку параметров систем регулирования под фактические характеристики технологических объектов управления, обеспечивая высокое качество стабилизации параметров в режимах, не допускаемых в условиях применения традиционных систем. Дополнительный эффект от применения таких систем связан с возможностью существенного сокращения (или даже исключения) периода наладки регулятора, т.к. система в принципе может осуществить автоматическую самонастройку.

В докладе рассматриваются и другие направления функционального развития АСУ ТП на базе современных ПТК.

Кондрашин Анатолий Васильевич

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kav@dsn.ru

УДК 681.515

И.В. ТЕТЕРЕВКОВ, ст. преподаватель

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфakovская 34
E-mail: tiv@atp.ispu.ru

Задача выбора лингвистических переменных в системах нечёткого управления теплоэнергетическими объектами

Аннотация. Показан подход к выбору лингвистических переменных в системах нечёткого управления теплоэнергетическими объектами, основанный на технологических соображениях. Приведен пример построения нечеткой системы для регулирования температуры перегретого пара.

Ключевые слова: нечеткая логика, выбор лингвистических переменных, АСР температуры перегретого пара.

I.V. TETEREV KOV senior Teacher

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

Task of a choice linguistic variables in systems of fuzzy logic of heat power objects

Abstract. The approach to a choice linguistic variables in systems of fuzzy logic of heat power objects based on technological reasons is shown. The example of construction of fuzzy system for regulation of temperature of overheated steam is given.

Key words: fuzzy logic, choice of linguistic variables, ACS of overheated steam temperature.

Особенностью работы теплоэнергетических объектов управления является изменение их свойств с течением времени (например, рост постоянной времени пароперегревателя в связи с увеличением зашлакованности поверхностей нагрева). Еще одним свойством, существенным для настройки элементов системы регулирования этих объектов, является зависимость их параметров от режимных факторов (чаще всего от нагрузки).

В этих условиях важным становится создание систем управления, обладающих свойством робастности, под которым понимается нечувствительность системы к изменению свойств объекта (то есть качественная отработка параметрических возмущений). Для решения этой задачи предназначены [1], например, адаптивные системы различных типов. Еще одним перспективным классом систем являются системы управления на базе нечеткой логики. Такие системы позволяют управлять, оперируя не количественными, а качественными понятиями, что снижает зависимость достигаемого качества от изменения

параметров объекта. При создании систем нечеткой логики необходимо выбрать:

- лингвистические переменные;
- вид функций принадлежности;
- тип алгоритма логического вывода;
- диапазоны нормирования лингвистических переменных для фаззификации/дефаззификации.

Диапазоны нормирования, как правило, определяются при настройке системы нечеткой логики. В качестве алгоритмов логического вывода наиболее распространены правила Мамдани и Сугено, а среди функций принадлежности – линейные и экспоненциальные.

Как ни странно, но наименее решенной является задача выбора типа лингвистических переменных. В большинстве работ предлагается "классический" набор переменных: ошибка управления и ее первая и вторая производные. Такой подход "наследует" приверженность к жесткому ПИД-закону регулирования: именно ПДД²-алгоритм обработки сигнала совместно с исполнительным механизмом постоянной скорости и реализует ПИД-закон. Но системы нечеткой логики изначально создавались не как модернизация, а как альтернатива ПИД-регулятору. Поэтому подобный выбор лингвистических переменных явно не способствует проявлению наилучших качеств систем нечеткой логики. В классических системах управления повышение качества регулирования достигается за счет использования дополнительных переменных (построение каскадных систем или систем с компенсацией внешних возмущений), причем выбор этих переменных осуществляется на основе технологических соображений. Эту же идею можно распространить и на системы нечеткой логики. Покажем это на примере АСР температуры перегретого пара.

В [2] приведена передаточная функция котла ТГМП–204 по каналу "возмущение впрыском – температура перегретого пара"

$$W(s) = -\frac{a_0}{s^2 + bs + a} e^{-\tau s},$$

параметры которой зависят от мощности энергоблока P (рассматривается диапазон от 400 до 800 МВт):

$$\tau(P) = 88 - 0,15P + 5 \cdot 10^{-5}P^2;$$

$$b(P) = (2,971 - 1,225 \cdot 10^{-3}P + 2,9 \cdot 10^{-6}P^2) \cdot 10^{-2};$$

$$a(P) = (1,479 + 2,315 \cdot 10^{-3}P + 1,9 \cdot 10^{-6}P^2) \cdot 10^{-4};$$

$$a_0(P) = (17,884 - 4,386 \cdot 10^{-2}P + 3,32 \cdot 10^{-5}P^2) \cdot 10^{-4}.$$

На рис. 1 показаны переходные процессы в системе нечеткого управления температурой перегретого пара при обработке внутреннего

10 %-го возмущения положением РО вприска (последовательно изображены процессы при нагрузке 400, 600 и 800 МВт).



Рис. 1. Переходные процессы в нечеткой системе

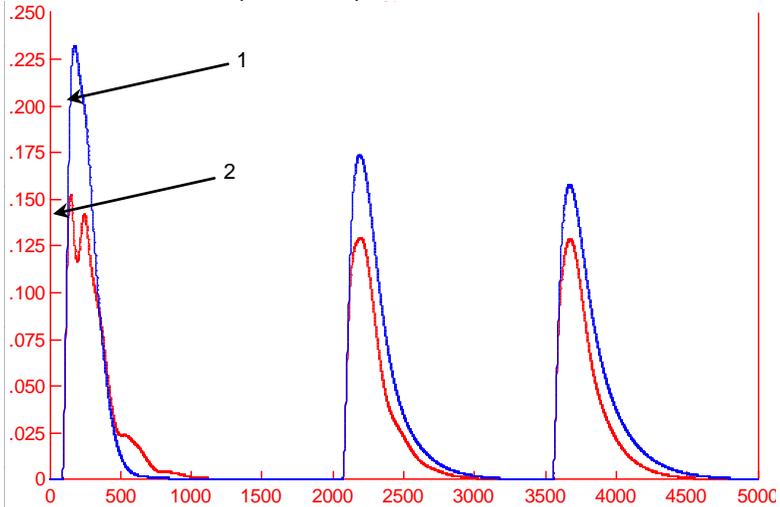


Рис. 2. Процессы в каскадной системе и системе нечеткой логики
1 – каскадная система; 2 – нечеткая система

Эти процессы получены для алгоритма Мамдани с экспоненциальными функциями принадлежности при использовании стандартного

набора лингвистических переменных. В практике отечественной теплоэнергетики для регулирования температуры первичного пара обычно применяется каскадная система с исчезающим сигналом из промежуточной точки. Используем идею работы этой системы для нечеткого управления для замены лингвистической переменной "вторая производная ошибки" на переменную "производная сигнала по температуре за впрыском". Переходные процессы в новой системе показаны на рис. 2 (условия работы соответствуют предыдущему примеру).

Для большей наглядности на рис. 2 показаны также процессы в системе с ИСПТ. Система нечеткого управления с сигналом по производной температуры за впрыском показывает лучшее качество работы по сравнению как с системой нечеткой логики со стандартным набором лингвистических переменных, так и по сравнению с каскадной системой регулирования.

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. **Гостев В.И.** Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. - К.: "Радиоаматор", 2008.

Тетеревков И. В.

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

УДК 681.51:621.311.22

С.Б. ПЛЕТНИКОВ, к.т.н., доцент,
В.Д. ТАЛАНОВ, к.т.н., профессор,
А.М. ДЕМИН, к.т.н., доцент

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

Тренажер «Система автоматического регулирования тепловой нагрузки барабанного котла»

Аннотация. Тренажер "Система автоматического регулирования тепловой нагрузки барабанного котла" предназначен для получения навыков практической работы при наладке регуляторов АСР горения газа в топке котла, для формирования умений при выполнении идентификации свойств объектов регулирования, для изучения и освоения технологий экспериментальной настройки параметров функциональных элементов систем, для освоения техники работы с тренажерами.

Ключевые слова: энергетический котел, система автоматического регулирования, наладка регуляторов, показатели качества, тренажер.

S.B. PLETNIKOV Candidate of Engineering, professor,
V.D. TALANOV Candidate of Engineering, professor,
A.M. Demin Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: *psb@atp.ispu.ru*

The simulator of a "Drum-type boiler thermal load automatic control system"

Abstract. The simulator of a "Drum-type boiler thermal load automatic control system" is intended to receive practical skills in boiler furnace gas combustion controller setting up, to shape the skills of control object parameters identification, to learn and to master the technology of experimentative setting up of system functional element parameters.

Key words: power-plant boiler, automatic control system, controllers setting up, quality rating, simulator.

На кафедре "Автоматизация технологических процессов" ИГЭУ для обучения студентов и представителей производственных предприятий продолжается разработка тренажеров, предназначенных для изучения и отработки технологий работ при настройке регуляторов теплоэнергетических объектов ТЭС.

В 2015 году начата эксплуатация нового тренажера "Система автоматического регулирования тепловой нагрузки барабанного котла". Он содержит файлы для сетевой организации автоматизированных рабочих мест – программа с вариативными свойствами (нагрузка котла, заданные параметры исполнительных механизмов и блоков интегрирования – более 100 вариантов заданий), средствами управления работой на тренажере, а также встроенные методические средства обучения.

При разработке тренажера в среде графического программирования LabVIEW 5.0 решены задачи: расширена библиотека моделей типовых элементов АСР и технологического оборудования, разработаны рабочие интерфейсы и экранные формы представления результатов, а также разработаны методические рекомендации при выполнении работ. При этом применена усовершенствованная технология создания программно-аппаратных комплексов и внедрены способы и средства управления качеством формируемых знаний обучаемых, которые отличаются от тех, что применялись в сериях тренажеров предыдущих лет [1].

Отображение на основном рабочем интерфейсе процессов на трендах (раздельно или комплексно) и величин технологических параметров на мнемосхеме, результатов в протоколах обеспечивает комплексирование оценки качества выполнения работ. Файлы встроенной интерактивной методической поддержки обеспечивают теоретическую подготовку и практическое выполнение работ.

Программный продукт предназначен для получения навыков практической работы при наладке регуляторов АСР горения газа в топке

барабанного котла, для формирования умений при выполнении идентификации свойств объектов регулирования, для изучения и освоения технологий экспериментальной настройки параметров функциональных элементов АСР, для освоения техники работы с тренажерами.

Функциональные возможности: представление реакции на тестовые сигналы регуляторов АСР горения газа в топке барабанного котла в дистанционном и автоматическом режимах работы настраиваемых регуляторов; изучение технологических основ наладки при работе с элементами АСР.

Структура АСР горения представляет один из вариантов с групповым воздействием регулятора давления пара (РДП) на регулятор расхода газа (РРГ) и регулятор общего воздуха, включающий регулятор расхода воздуха (РРВ) и корректирующий регулятор (РКор) экономичности процесса горения. Работа регулятора разрежения в топке (РРТ) через устройство динамической связи настраивается в зависимости от работы направляющих аппаратов дутьевых вентиляторов.

Основной рабочий интерфейс имеет несколько полей и группу основных клавиш и контроллеров управления работой тренажера (рис. 1).

Для отработки задач технологии наладки АСР ведутся контроль и запись величин. На мнемосхеме и в группе формируемых графиков контролируемые параметры – указатели положения исполнительных механизмов УП ИМ, расход топлива (газа), перепад давлений на воздухоподогревателе, содержание кислорода в уходящих дымовых газах, разрежение в топке, давление пара (параметры работы АСР выведены на основной интерфейс с переключателем трендов). Предусмотрена возможность масштабирования процессов на графиках путем изменения диапазонов.

Особенностью данного тренажера является отработка технологии работ с физическими сигналами технологических параметров объекта управления и контролем нормированного сигнала рассогласования на входе ПИ-звена регулятора. Индикаторы величин этих параметров, а также сигнала рассогласования и промежуточных значений в каскадных схемах обеспечивают контроль основных параметров, характеризующих работу АСР. Непрерывный визуальный контроль этих параметров обеспечивает статическое и динамическое комплексирование входных и промежуточных сигналов в процессе наладки АСР.

Контроллер управления временем позволяет адаптировать условия работы с тренажером к возможностям обучаемого и инерционным свойствам каналов управления.

Справа на основном рабочем интерфейсе расположены функциональные клавиши, среди которых основными являются следующие.

"Параметр" – выбор параметра (контура регулирования).

"Нагрузка" – выбор заданной нагрузки котла.

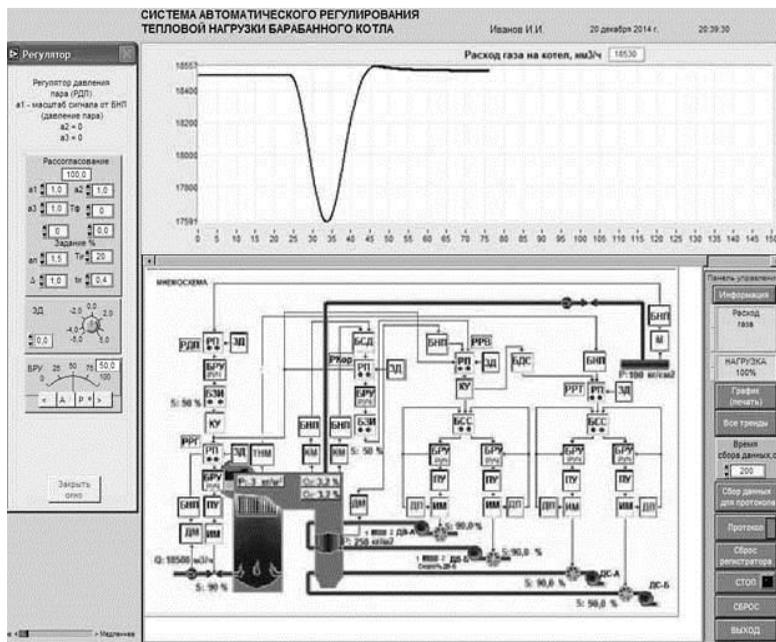


Рис. 1. Основной рабочий интерфейс

"График (печать)" – получение временных процессов по параметрам системы; предусмотрена возможность масштабирования процессов путем изменения диапазонов изменения параметров и времени.

"Все тренды" – контроль качества совместной работы регуляторов.

"Время сбора данных, с" – задание временного интервала для обработки переходных процессов, которые формируются в протоколах испытаний.

"Сбор данных для протокола" – начало отсчета временного интервала для обработки переходных процессов, которые формируются в протоколах испытаний.

"Протокол" – обращение к окну выбора требуемого протокола и получение протокола испытаний: обеспечивает вывод на печать параметров настройки и переходных процессов.

На рабочих полях основного интерфейса имеются следующие активные элементы: функциональные блоки с наборами параметров настройки, БРУ с кнопками управления режимом работы регуляторов, внешние задатчики, ключи включения и выключения двигателей ДВ и ДС, а также переключателей скорости работы ДВ;

Тренажер позволяет обрабатывать не только экспериментальные способы настройки регуляторов, но и расчет параметров по результатам идентификации свойств объектов и элементов АСР.

Литература

1. **Таланов В.Д.** Способы и средства управления качеством обучения / Таланов В.Д., Демин А.М., Плетников С.Б. / Сб. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (XV «Бенардосовские чтения»), Иваново, 27-29 мая 2009 г. – Т. 1: с. 220-221.

Плетников Сергей Борисович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: psb@atp.ispu.ru

Таланов Вадим Дмитриевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: tvd@atp.ispu.ru

Демин Александр Матвеевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: dam@atp.ispu.ru

УДК 518.5

Е. Л. МАЛКОВА, ст. преподаватель

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

О проблемах оптимального выбора ПТК при проектировании систем автоматизации

Аннотация. Описаны проблемы выбора программно-технических комплексов (ПТК), возникающие на стадии проектирования автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП). Предложены способы их решения, использующие математический аппарат нечеткой логики.

Ключевые слова: АСУ ТП, выбор ПТК, нечеткая логика.

E.L. MALKOVA, senior teacher
Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: tvd@atp.ispu.ru

On the problems of optimum choice STC in design automation systems

Abstract. Shown the problems of the choice of program-technical complexes (PTC) at the design stage of automated control system of technological process (APCS). Proposed the way of solution using fuzzy mathematics.

Key words: APSC, selection of PTC, fuzzy mathematics.

Актуальность задачи выбора оптимального программно-технического комплекса (ПТК) для систем автоматизации технологических процессов не только не спадает, но даже возрастает. Прежде всего, это связано с ростом конкуренции производителей и с увеличением номенклатуры выпускаемых средств автоматизации. Кроме того, в последние годы задача обоснованного выбора ПТК часто подменялась выбором удобного коммерческого партнёра, умеющего нейтрализовать своих конкурентов на стадии размещения заказа на АСУ ТП.

Существенная сложность задачи обоснованного выбора типа ПТК объясняется тем обстоятельством, что разные производители характеризуют свои разработки порой плохо сопоставимыми показателями. В этих условиях только объективный независимый анализ продукции имеет перспективу дать шанс создания методов решения рассматриваемой задачи.

Дополнительным обстоятельством, снижающим интерес к задаче выбора ПТК, обусловлен тем, что практически с помощью большинства изделий этого класса может быть реализовано большинство требуемых функций обработки информации и управления.

При более внимательном изучении проблемы выявляются обстоятельства, обычно не принимаемые во внимание при выборе ПТК. В частности, не учитываются параметры, отражающие специфику таких внутренних процессов в самой АСУ ТП, как:

1) Конфигурирование, мониторинг и тестирование ресурсов, обеспечивающих:

- получение информации об оборудовании (типе процессорного модуля, объему ОЗУ, ПЗУ, энергонезависимой памяти и т.п.);
- задание конфигурационных параметров программных модулей;
- задание конфигурационных параметров модулей ввода/вывода;
- конфигурирование коммуникационных портов;
- чтение/запись значений внутренних переменных процессорного модуля и т.п.;
- возможность ограничения прав доступа к ресурсам контроллера.

2) Поддержка модулей УСО, связанная с обработкой информации в модулях аналогового, дискретного и импульсного ввода/вывода.

3) Поддержка коммуникационных портов (COM) и их выхода на каналы связи с различными протоколами обмена данными - Ethernet, RS-232, RS-485, GPRS, модемное соединение/GSM, CDMA2000 и т.п.

4) Обмен данными с системами верхнего уровня (Isacom, TP410, OPC и т.п.).

5) Обеспечение основных режимов работы ЦП (конфигурирование, управление, блокировка выходов и пр.).

6) Синхронизация (зеркализация) данных, резервирование процессорных модулей, модулей УСО и сети.

7) Диагностика сетевых подключений, файловых систем, модулей ввода/вывода и т.п.

8) Ведение архива событий и оперативная обработка огромного потока входной информации в режиме реального времени;

Изучение проблемы показало, что не сложилась ещё критериальная основа для процедур выбора ПТК. С технической точки зрения формализация задачи достаточно сложна, т.к. возникают сложности применения метрик при сравнении свойств, не только плохо поддающихся чёткой количественной оценке, но и описываемых разными системами признаков (в разных координатах).

Рассматривается возможность привлечения методов, которые специально ориентированы на построение моделей, учитывающих неполноту и неточность исходных данных. В первую очередь это касается теории нечетких множеств, которая дает возможность структурировать все то, что разделено не очень точными границами.

Если за x принять функции ПТК, а за y сами ПТК, то задача состоит в выполнении отображения вида:

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow y \in \{d_1, d_2, \dots, d_m\}.$$

Классификация на основе нечеткого логического вывода происходит по базе знаний вида:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left(\bigcap_{i=1}^n x_i = a_{i,jp} \text{ с весом } w_{jp} \right) \rightarrow y = d_j, j = \overline{1, m}.$$

Малкова Екатерина Леонидовна

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: avel-angel@yandex.ru

Подсекция «ТЕХНОЛОГИЯ ВОДЫ И ТОПЛИВА НА ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ»

УДК 621.311

А.С. СЕДЛОВ, д.т.н., профессор; Е.Н. ПОТАПКИНА, к.т.н., доцент;
А.А. ГРАЖДАНОВ, А.А. ГОРДЕЕВ, М.С. ТОМАШЕВСКАЯ

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250, Москва, ул. Красноказарменная, д.14
E-mail: PotapkinaYN@mpei.ru

Технологии обессоливания воды на ТЭС

Аннотация. Представлен обзор основных технологий обессоливания воды на ТЭС. Приводятся результаты исследования по переходу в пар органических примесей в процессе перегонки природных вод.

Ключевые слова: водоподготовка, термическое обессоливание, термоллиз органических веществ

A.S. SEDLOV, Doctor of Engineering, professor;
E.N. POTAPKINA, Candidate of Engineering, docent;
A.A. GRAZHDANOV, A.A. GORDEYEV, M.S. TOMASHEVSKAYA

Desalination technology to the power station

Abstract. Provides an overview of the core technology of desalting water to the power station. The results of studies on the transition to organic impurities in steam distillation process of natural waters.

Key words: water treatment, thermal desalination, thermolysis of organic substances

В конце XX в. наибольшее распространение в нашей стране получила технология обессоливания воды на базе параллельно-точных ионитных фильтров (для вод с малой и средней минерализацией) и термическое обессоливание (для вод с высокой минерализацией или повышенной окисляемостью) [1]. Ужесточение экологических требований к водоподготовке, ухудшение качества обрабатываемых вод и высокие эксплуатационные затраты привели к созданию новых технологий обработки воды.

Предложения по совершенствованию технологий обессоливания воды на ТЭС можно разделить на следующие группы: оптимизация действующих установок ионитного химического обессоливания (ХОУ), направленных на сокращение расхода реагентов и стоков; разработка схем ХОУ на основе противоточных технологий; разработка схем обессоливания на основе мембранных методов обработки воды; создание малоотходных технологий на основе термического метода [2,3]. Реализация названных направлений совершенствования водоподготовки на

ТЭС в начале XXI в. привела к созданию ряда новых технологических систем.

Принципиальная технологическая схема противоточного ХОУ предусматривает следующие стадии и обработки воды. Исходная вода поступает в осветлители, где обрабатывается известью, коагулянтом и флокулянтом, в том или ином сочетании. Далее осветленная вода собирается в бакахосветленной воды и фильтруется через механические фильтры. Осветленная вода сначала подается на противоточные Н-катионитные фильтры, а затем на ОН-анионитные противоточные фильтры. Обессоленная вода используется для восполнения потерь пара и конденсата.

При работе установки комбинированного обессоливания (КОУ) исходная вода проходит все стадии предварительной обработки так же, как в предыдущем случае. Далее осветленная вода подкисляется серной кислотой и после дозирования антискаланта через фильтры тонкой очистки подается в установку обратного осмоса (УОО). Пермеат УОО проходит дообессоливание на Н- и ОН-ионитных фильтрах, после чего направляется для восполнения потерь пара и конденсата.

При работе установки термического обессоливания (ТОУ) исходная вода проходит все стадии предварительной обработке, аналогичные ХОУ и КОУ. Далее осветленная вода подается на противоточные Na-катионитные фильтры и после деаэрации идет на питание многоступенчатой испарительной установки (МИУ). Дистиллят МИУ направляется на восполнение потерь пара и конденсата.

При обессоливание по всем схема образуются сточные воды, которые после согласования условий их приема обычно отводятся в окружающую среду. Выбор того или ионного варианта обессоливания должен основываться на технико-экономических расчетах, учитывающих фактические условия эксплуатации и включающих плату за исходную и сбросы сточных вод. Такие расчеты проводились рядом организаций и достаточно хорошо согласуются с [4, 5]. При небольшой минерализации природных вод, суммарное содержание в которых хлорид- и сульфат-ионов не превышает 2-3 мг-экв/дм³, наиболее экономичным является метод ионообменного химического обессоливания. Другие технологии имеют преимущества при более высокой минерализации исходной воды. Так, например, термическое обессоливание рекомендуется для вод с повышенной минерализацией или окисляемостью [1]. Указанное выше обстоятельство хорошо согласуется с результатами исследований термолитиза органических веществ.

Результаты исследования термолитиза органических веществ, включающих природные гуматы, аминокислоты и др., в водных растворах показывают, что начало их деструкции относится к температурам около 150 °С в среде с повышенным окислительным потенциалом (наличие кислорода, катионов Fe³⁺, пониженное значение pH и др.) [6]. При отсутствии окислителей начало термолитиза смещается в зону более

высоких температур. Показано также, что при температуре 100°C (очевидно, и при близких температурах – вплоть до 150°C) коэффициент распределения простейших карбоновых кислот (муравьиной и уксусной) невысок и находится на уровне 0,5 [7]. В табл. 1 представлены данные по переходу в пар некоторых органических примесей в процессе перегонки ряда природных вод [8].

В табл. 1 в числителе приведено содержание примесей в исходной воде, а в знаменателе – в дистилляте. Анализ представленных данных подтверждает, что дистилляция позволяет достаточно глубоко очищать воду от органических нелетучих примесей. В отечественной практике температурный режим МИУ с испарителями типа И характеризуется значениями температуры вторичного пара $150\text{--}160^{\circ}\text{C}$ в первом корпусе с понижением температуры на $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$ в последующих корпусах. Опыт работы отечественных испарительных установок подтверждает, что сколько-нибудь существенного выноса с паром ИУ органических нелетучих веществ или продуктов их термолитиза при принятой технологии термического обессоливания не происходит.

Таблица 1. Состав органических примесей в воде до и после их дистилляции

Показатель	Природная вода		
	г. Москва	г. Санкт-Петербург	г. Воронеж
1	2	3	4
Содержание аминокислот, мкг N/дм ³	5/-	6/6,6	20/7,5
Содержание белков, мкг N/дм ³	123/30	125/26,5	68/7
Содержание карбоновых кислот, мкг-экв/дм ³	17/3	226/6,5	8,5/2,5
Содержание сложных эфиров, мкг-экв/дм ³	112/117	100/112	95/100
Содержание гуминовых кислот, мкг/дм ³	440/-	540/42	10/-
Содержание фульвокислот, мкг/дм ³	13400/100	9850/185	1125/115
Окисляемость, мгО/дм ³	9/0,3	7,4/0,3	1,2/0,4

Литература

1. ВНТП81. Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций. М.: МЭИ СССР, 1981.
2. Теоретическое и экспериментальное обоснование способов обессоливания с многократным использованием регенерационного раствора /Седлов А.С., Шищенко В.В., Чебанов С.Н. и др. - Теплоэнергетика, 1995, №3.
3. Юрчский Е.Б., Первов А.Г., Андрианов А.П. Перспективы использования мембранных технологий водоподготовки для предотвращения загрязнения пароводяных трактов ТЭС органическими примесями природных воды. – Теплоэнергетика, 2006, №8.

4. **Выбор** оптимального метода водоподготовки для тепловых электрических станций/ Седлов А.С., Шищенко В.В., Федосеев Б.С., Потапкина Е.Н. - Теплоэнергетика, 2005, №4.

5. **Юрчевский Е.Б., Ларин Б.М.** Разработка, исследование и внедрение водоподготовительного оборудования с улучшенными экологическими характеристиками.- Теплоэнергетика, 2005, №7.

6. **Ларин Б.М., Морыганова Ю.А.** Органические соединения в теплоэнергетике, Иваново, 2001.

7. **Унос** уксусной кислоты паром/Коровин В.А., Щербина С.Д., Рубчинская С.М. и др.– Энергетик, 1995, №9.

8. **Водоподготовка** на ТЭС с использованием городских сточных вод/ Абдулаев К.М., Малахов И.А., Полетаев Л.П., Соболев А.С. – М.: Энергоатомиздат, 1988.

Седлов Анатолий Степанович,

ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский университет "МЭИ",

e-mail: SedlovAS@mpei.ru

Потапкина Елена Николаевна,

ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский университет "МЭИ",

E-mail: PotapkinaYN@mpei.ru

Гражданов Александр Александрович,

ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский университет "МЭИ"

e-mail: PotapkinaYN@mpei.ru

Гордеев А.А.

ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский университет "МЭИ"

e-mail: PotapkinaYN@mpei.ru

Томашевская Мария Станиславовна,

ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский университет "МЭИ"

e-mail: PotapkinaYN@mpei.ru

УДК 621.321

Е.А. КАРПЫЧЕВ, к.т.н., ст. преподаватель;

А.Я. СОРОКИНА, инженер;

Е.Г. УХАЛОВА, инженер;

А.Ю. БУДАЕВА, инженер;

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

E-mail: karpuchev3108@bk.ru

Исследование эффективности восстановительной обработки высокоосновного анионита Purolite A-400

Аннотация. Показана эффективность соле-щелочной восстановительной обработки анионита от железоорганических соединений. Приведены зависимости количества вымываемых органических соединений от длительности и кратности обработки анионита.

Ключевые слова: иониты, аниониты, соле-щелочная регенерация

E.A. KARPUCHEV, Candidate of Engineering, senior Teacher
A.YA. SOROKINA, master;
Ye.G. UKHALOVA, master;
A.YU. BUDAYEVA, master

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34.
E-mail: karpuchev3108@bk.ru

Investigation of the effectiveness of rehabilitation processing of highly basic anion exchanger Purolite A-400

Abstract. The efficiency of salt-alkaline reductive treatment of the anion exchanger from organoiron compounds. The dependences of the quantity of washed organic compounds on the duration and frequency of treatment of the anion exchanger.

Key words: resins, anion exchange resins, salt alkaline regeneration.

На водоподготовительных установках ТЭЦ существует проблема, связанная с «отравлением» ионитов. Особенно актуальной эта проблема становится при использовании высокоосновных анионитов, которые в наибольшей степени подвержены этому негативному эффекту.

«Отравление» ионитов обусловлено забиванием функционально-активных групп ионитов железорганическими соединениями (гуматами). Основной причиной поступления железорганических примесей на иониты является недостаточно эффективная работа предварительной очистки ВПУ.

Эффект «отравления» ионитов проявляется:

- в уменьшении рабочей обменной ёмкости;
- в ухудшении показателей качества обработанной воды;
- в увеличении удельных расходов воды, кислоты и щёлочи на собственные нужды ионитной части ВПУ.

Для восстановления рабочих характеристик ионитов традиционно прибегают к их восстановительной обработке.

Наиболее подробно эта технология описана в СТО ВТИ 37.002-2005. Суть технологии заключается в предварительной регенерации ионита, обработке сначала 2 %-ным раствором кислоты с последующей отмывкой затем обработкой щелочным раствором хлористого натрия, состоящим из 4 %-ной щёлочи и 10 %-ного раствора поваренной соли, и последующей отмывкой и регенерацией.

Проведены лабораторные восстановительные соле-щелочные обработки высокоосновного анионита Purolite A-400, отработавшего в цикле обессоливания воды более пяти лет.

Целью лабораторных исследований являлась проверка эффективности соле-щелочной обработки, а так же определение влияния продолжительности и кратности обработки на получаемый эффект.

Для количественной характеристики содержания органического вещества в воде использован косвенный метод.

Наиболее распространенными являются окислительные методы определения содержания органического вещества по количеству кислорода, расходуемого на его окисление. Это – так называемые окисляемость воды O_k (окислитель – перманганат калия) и химическое потребление кислорода ХПК (окислитель – бихромат калия). Наиболее полно окисляется органическое вещество при бихроматном методе (90-95%), менее – при перманганатном методе (около 40-45 %).

Для вычисления по ХПК концентрации (мг/л) в воде углерода, содержащегося в органическом веществе, необходимо ХПК (мгО₂/л) умножить на коэффициент 0,375 (то есть 12/32); для перманганатной окисляемости этот коэффициент можно принять равным 1,0. Полагая, что масса углерода составляет около 50 % массы органического вещества, для вычисления примерного содержания органического вещества надо найденное количество углерода удвоить. Получается следующая формула (1) расчета концентрации органических веществ в воде:

$$C_{орг} \approx 0,75 \cdot \text{ХПК} \approx 2 \cdot O_k, \quad (1)$$

где $C_{орг}$ – концентрация органических соединений, мг/л, ХПК - химическое потребление кислорода, мгО₂/л, O_k – перманганатная окисляемость воды, мгО₂/л.

На рис. 1 и 2 приведены зависимости количества вымываемых органических соединений в зависимости от длительности и кратности обработки высокоосновного анионита Purolite A-400.

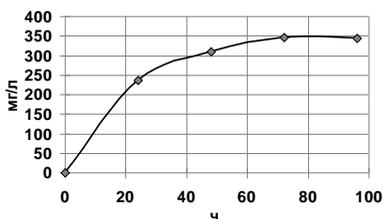


Рис. 1. Зависимость количества вымываемых органических соединений от длительности обработки анионита

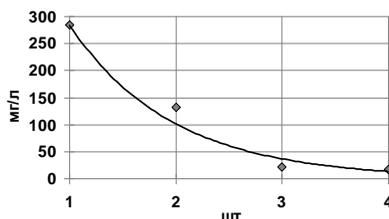


Рис. 2. Зависимость количества вымываемых органических соединений от кратности обработки анионита

На рис. 3 и 4 приведены зависимости количества вымываемых соединений железа в зависимости от длительности и кратности обработки высокоосновного анионита Purolite A-400.

На основании зависимостей рис. 1–4 сделаны следующие выводы:

- длительность восстановительной обработки анионита не более суток существенно влияет на эффективность вымывания железоорганических соединений. Дальнейшее увеличение длительности обработки не приведет к значительному увеличению эффекта очистки;

- при увеличении кратности восстановительной обработки анионита эффективность удаления органических соединений уменьшается. Действительно, наибольшее количество органических соединений (в основном гуматов) под действием щелочей хорошо растворяются и переходят в моющий раствор;

- при увеличении кратности восстановительной обработки анионита эффективность удаления соединений железа увеличивается. Этот эффект можно объяснить амфотерностью соединений железа. Под действием щелочей происходит постепенное растворение железа (разрушение его комплексов) с последующим выходом в моющий раствор.

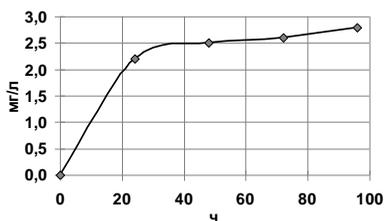


Рис. 3. Зависимость количества вымываемых соединений железа от длительности обработки анионита

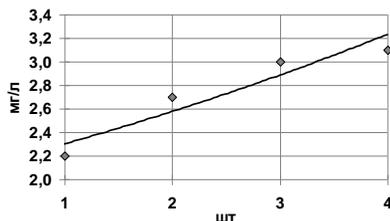


Рис. 4. Зависимость количества вымываемых соединений железа от кратности обработки анионита

Есть два пути решения проблемы «отравления» ионитов: проведение восстановительных обработок или полная их замена. Первое направление наиболее приоритетно ввиду высокой стоимости ионообменных материалов.

Полученные в работе выводы и результаты в основном согласуются с методикой, описанной в СТО ВТИ 37.002-2005, однако в отношении удаления соединений железа из ионитов требуют дополнительного изучения.

Литература

1. СТО ВТИ 37.002-2005 «Основные требования к применению ионитов на водоподготовительных установках тепловых электростанций. Технологические рекомендации по диагностике их качества и выбору».
2. Унифицированные методы анализа вод. Издание второе исправленное. Под ред. Ю.Ю. Лурье. Изд-во «Химия». М. 1973 г.

УДК 621.321

Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н., профессор

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

Расчетный анализ схем обессоливания воды на ТЭС на базе мембранных методов

Аннотация. Приведен обзор основных схемных решений по получению обессоленной воды на ТЭС на базе мембранных методов. Представлены результаты технологического расчета, показывающие преимущества схем обессоливания на базе обратного осмоса по сравнению с традиционными технологиями.

Ключевые слова: водоподготовка, мембранные технологии, обратный осмос

E.N. BUSHUEV, Doctor of Engineering, professor

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

Design analysis desalting water to the power station membrane based methods

Abstract. An overview of the main circuit solutions for obtaining desalinated water to the power station on the basis of membrane methods. Predstvleny technological calculation results showing the benefits of schemes based desalination by reverse osmosis, compared with traditional technologies.

Key words: water treatment, membrane technologies, reverse osmosis

Решить задачу сокращения эксплуатационных расходов на водоподготовку на ТЭС и АЭС, повышение экологичности и улучшения качества получаемой воды можно путем внедрения новых технологий. Развитие методов водоподготовки в энергетике связано, прежде всего, с мембранными технологиями.

Большинство вновь вводимых энергоблоков на ТЭС и АЭС комплектуются установками получения обессоленной воды, содержащими аппараты мембранной технологии – установки обратного осмоса, ультрафильтрации, электродеионизации, работа которых основана на продавливании воды через пористые мембраны. В основном, технологические схемы таких водоподготовительные установки (ВПУ) для получения обессоленной воды на базе мембранных методов состоят из трех частей:

- предварительной очистки исходной воды;
- установки обратного осмоса (УОО);
- степени дообессоливания.

Степень предварительной очистки может включать следующие технологии водообработки:

- традиционную коагуляцию в осветлителях с последующим фильтрованием на механических фильтрах (МФ);
- очистку с использованием осветлителей АКТИФЛО;
- прямоточную коагуляцию с последующим осветлением на установке ультрафильтрации (УУФ).

Состав ступени дообессоливания зависит от требований к качеству обессоленной воды и может состоять из следующих ступеней:

- Н-, ОН-ионирования (Н-А);
- декарбонизации (Д);
- ионирования на фильтрах смешанного действия (ФСД);
- деминерализации на второй ступени УОО (УОО_{II});
- электродеионизации (ЭДИ).

Проведенный анализ литературных источников [1,2], ряда проектных решений показал, что наиболее рассматриваемыми схемами при проектировании строящихся или реконструируемых ВПУ для получения глубокообессоленной воды являются:

- осветлитель–МФ–УОО–Н–А–ФСД;
- МФ–УУФ–УОО–Н–А–ФСД (комбинированная схема);
- МФ–УФФ–УОО–Н–А–ЭДИ;
- УОО–УОО–Д–УОО_{II}–ЭДИ (комплексная схема);
- осветлитель АКТИФЛО–УОО–Д–УОО_{II}–ЭДИ;
- осветлитель–УФФ–УОО–Н–А–ЭДИ.

Разработаны методики по расчету указанных схем обессоливания, адекватность которых была проверена путем сопоставления с данными из проектной документации для ряда строящихся ТЭС и АЭС.

Были проведены многовариантные расчеты основных технологических и экологических показателей для схем обессоливания воды на базе мембранных методов в широком диапазоне минерализации исходной воды ($[\text{SO}_4^{2-}] + [\text{Cl}^-] = 1\text{--}10$ мг-экв/л).

Проведенный расчетный анализ показал, что схема традиционного химического обессоливания по ряду показателей уступает схемам на базе мембранных технологий, она является не экологичной (см. рис. 1) и требует большого расхода реагентов, в первую очередь кислоты (рис. 2) и щелочи. К преимуществу этой схемы, следует отнести высокую надежность в получении обессоленной воды и низкий коэффициент использования воды на собственные нужды (рис. 3).

Рассмотренные схемы на базе мембранных методов позволяют получить обессоленную воду высокого качества и являются ресурсосберегающими, т.к. требуют малые расходы реагентов, при их эксплуатации образуются менее минерализованные сточные воды, что ведет к повышению экологичности ВПУ, снижению эксплуатационных затрат.

У сравниваемых схем различия в показателях незначительны, поэтому за основу выбора необходимо брать обеспечение надежности получения обессоленной воды, возможность подвоза реагентов и капитальные затраты на их внедрение.

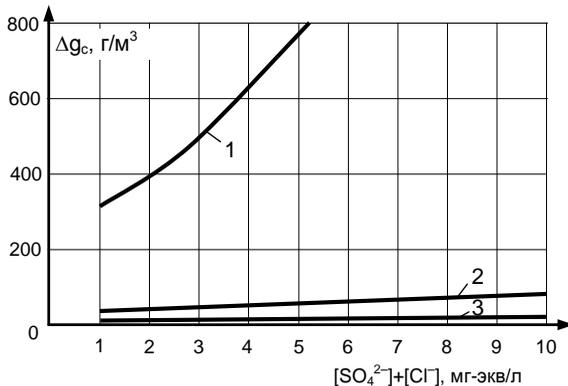


Рис. 1. Удельный сброс солей без учета сброса солей поступающей с исходной водой в зависимости от метода обессоливания и минерализации исходной воды:

- 1 – химобессоливание на базе противоточных ионитных фильтров;
 2 – комбинированная схема; 3 – комплексная схема

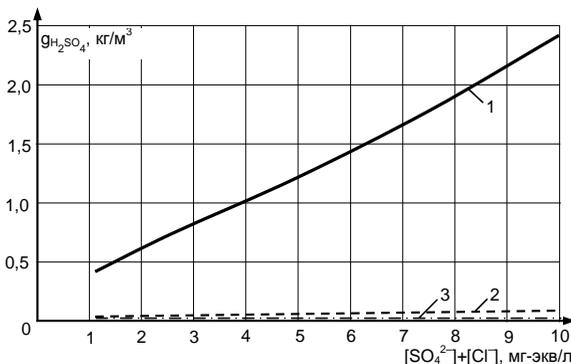


Рис. 2. Удельные расходы серной кислоты (в пересчете на 100% вещество) в зависимости от метода обессоливания и минерализации исходной воды:

- 1–3 – см. рис. 1

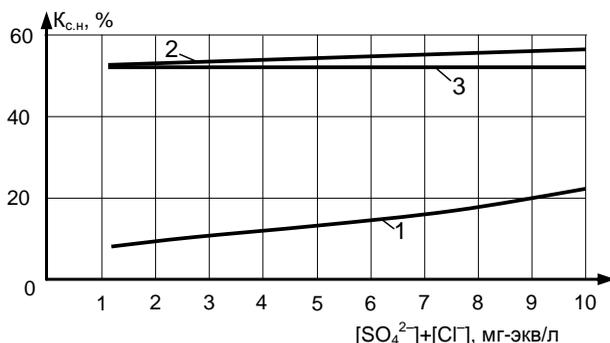


Рис. 3. Коэффициент собственных нужд ВПУ в зависимости от метода обессоливания и минерализации исходной воды:
1–3 – см. рис. 1

Таким образом, проведенный расчетный анализ основных схем обессоливания на базе мембранных методов показал явные технологические и экологические преимущества по сравнению с другими схемами получения обессоленной воды на ТЭС.

Литература

1. Проектные решения водоподготовительных установок на основе мембранных технологий / А.А. Пантелеев, Б.Е. Рябчикова, А.В. Жадан, О.В. Хоружий // Теплоэнергетика. 2012. №7. С.30–36.
2. Бушуев Е.Н., Еремина Н.А., Жадан А.В. Анализ современных технологий водоподготовки на ТЭС // Вестник ИГЭУ, 2013. Вып. 1. С. 8–14.

Бушуев Евгений Николаевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: bushuevEN@mail.ru

УДК 621.321

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

Практическое применение математической модели расчета электропроводности технологических вод ТЭС

Аннотация. Показаны возможности применения математической модели электропроводности для оценки диагностических возможностей систем автоматического контроля за технологическими водами ТЭС, основанных на приборных измерениях.

Ключевые слова: математическая модель, химический контроль, водоподготовка

E.N. BUSHUEV, Doctor of Engineering, professor;
N.V. BUSHUEVA, senior Teacher

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: *admin@xste.ispu.ru*

Practical application of mathematical models to calculate the electrical conductivity of process water TES

Abstract. Possibilities of using mathematical models to assess the electrical conductivity of the diagnostic capabilities of systems of auto-matic control of the technological waters of TPP, on the basis of instrumental measurements.

Key words: mathematical model, chemical control, water treatment

Одним из важных показателей, используемых в химическом контроле за системами обработки воды на ТЭС, является удельная электропроводность, который характеризует суммарное содержание ионных примесей в технологических водах.

На кафедре ХХТЭ ИГЭУ разработана математическая модель электропроводности [1], действие которой распространяется начиная с вод типа конденсат и заканчивая стоками после регенерации ионитных фильтров. Модель учитывает содержание основных ионов присутствующих в поверхностных природных водах, взаимное влияние ионов, образование ионных пар, вязкость среды и температура раствора. Расчетная ошибка при этом не превышает 2–4 %, что укладывается в приборную ошибку измерений этого показателя кондуктометром.

При расчете удельной электропроводности по известному составу ионных примесей решается прямая вычислительная задача: по известному ионному составу технологической воды рассчитать значение удельной электропроводности раствора, т.е.

$$\chi_{\text{расч}} = \chi_p(C_{\text{H}^+}, C_{\text{Ca}^{2+}}, C_{\text{Mg}^{2+}}, C_{\text{Na}^+}, C_{\text{K}^+}, C_{\text{SO}_4^{2-}}, C_{\text{Cl}^-}, C_{\text{HCO}_3^-}, t), (1)$$

где C_{H^+} , $C_{\text{Ca}^{2+}}$ и т.д. – концентрации соответствующих ионов в воде, ммоль(экв)/л; t – температура раствора, °С.

Концентрация ионов OH^- не задается, ибо находится при известной концентрации ионов H^+ из ионного произведения воды при температуре t . По той же причине не задается концентрация карбонатов в воде.

Разработанная математическая модель была использована для разработки вычислительного алгоритма и программного продукта (ПП) по расчету удельной электропроводности водных растворов электролитов, применяемых на ТЭС в виде исполняемого модуля [2]. Реализована расчетная методика, также в виде функции в рамках компьютерной библиотеки (в формате dll), что позволяет ее использовать при созда-

нии других программных продуктов, в математических пакетах, например Mathcad.

Программа дает возможность рассчитать удельную электропроводность водного раствора либо по заданным концентрациям основных ионов, либо по заданной смеси электролитов. ПП позволяет определять и выводить значения ряда промежуточных параметров, являющихся важными характеристиками водных растворов, таких как концентрации ионных пар, эквивалентные электропроводности отдельных ионов, коэффициенты активностей ионов, относительную вязкость раствора и т.д.

Практическое применение математической модели электропроводности реализованной в виде ПП состоит в следующем.

Задавая остаточные и проскоковые концентрации сорбируемых ионов по стадиям водообработки, можно оценивать диапазоны изменения показателей pH и удельной электропроводности, а следовательно, получить основную характеристику для оценки возможности использования приборных измерений для оценки возможности диагностирования определения момента истощения ионитных фильтров в рамках систем автоматического химконтроля (АХК).

В качестве примера можно привести результаты расчёта показателей качества воды по стадиям традиционного химического обессоливания для воды из реки Волга, осветленной коагуляцией и известкованием, при различных режимах работы ионитных фильтров (рис. 1).

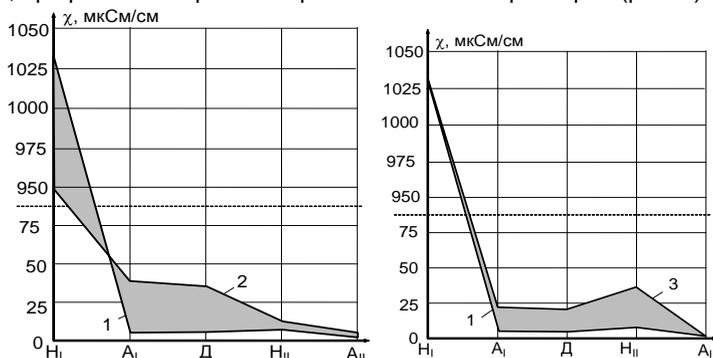


Рис. 1. Изменение удельной электропроводности по стадиям обработки воды для схемы традиционного химобессоливания при истощении катионита в фильтре H_I (а) и истощении анионита в фильтре A_I (б):

H_I , H_{II} – Н-катионитные фильтры первой и второй ступени, соответственно; A_I , A_{II} – ОН-анионитные фильтры первой и второй ступени, соответственно; D – декарбонизатор; 1 – рабочий режим обессоливания; 2 – истощение катионита в фильтре H_I ; 3 – истощение анионита в фильтре A_I

Анализ полученных результатов показывает, что истощение ионитных фильтров первой ступени характеризуется значительным

изменением удельной электропроводности по сравнению со значениями при рабочем режиме ионирования, такие изменения надежно фиксируются промышленными приборами АХК.

Аналогичный расчет был проведен для схемы химобессоливания по противоточной технологии. Из-за малой разницы между остаточной и проскоковой концентрациями ионов натрия после противоточного Н-катионитного фильтра и отсутствия еще одной барьерной ступени катионирования обостряется проблема оперативного определения момента истощения катионита. Кроме того, проскок ионов на Н-катионитном фильтре сразу же вызовет проскок кремниевой и угольной кислот в обессоленную воду. В табл. 1 представлены результаты расчета удельной электропроводности (χ) и рН при различных режимах работы ионитной установки в сравнении с данными проточного ионирования.

Анализ полученных результатов показывает:

- истощение Н-катионитного фильтра определяется незначительным увеличением показателя рН в фильтрате A_1 по сравнению с рабочим режимом – с 4,89 до 5,1 и одновременным изменением удельной электропроводности фильтрата с 6,0 до 4,7 мкСм/см;

- истощение фильтра A_1 определяется небольшим уменьшением рН в фильтрате A_1 по сравнению с рабочим режимом – с 4,89 до 4,08 и значительным увеличением удельной электропроводности фильтрата – с 6,0 до 35,7 мкСм/см.

Таблица 1. Расчетные показатели качества воды по стадиям обработки при разных режимах работы блока фильтров при различных технологиях ионирования

Режим работы ионитных фильтров	$H_1 (H_{\text{прот}})$			A_1		
	C_{Na^+} , мг/л	рН	χ , мкСм/см	C_{Cl^-} , мг/л	рН	χ , мкСм/см
Прямоточное ионирование						
Рабочий режим	1,0	2,58	1031	0,5	6,11	5,1
Истощение в H_1	8,0	2,64	947	1,0	9,43	39,0
Истощение в A_1	1,0	2,58	1031	3,0	4,36	24,2
Противоточное ионирование						
Рабочий режим	0,05	2,58	1043	0,5	4,89	6,0
Истощение в $H_{\text{прот}}$	0,2	2,58	1043	0,5	5,10	4,7
Истощение в A_1	0,05	2,58	1041	3,0	4,08	35,7

Таким образом, АХК на основе показаний кондуктометров и рН-метров для схемы химобессоливания по технологии АПКОР возможен, но для обеспечения большей надёжности системы следует добиваться срабатывания в первую очередь фильтра A_1 .

Проводя расчёты при остаточных и проскоковых концентрациях ионов можно получить основные характеристики для выбора приборов автоматического химконтроля и их рабочие диапазоны.

Литература

1. **Бушуев, Е.Н.** Разработка математической модели электропроводности технологических вод ТЭС / Е.Н. Бушуев // Вестник ИГЭУ. –2009. –№2. –С.56–61.
2. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015610800. Расчет удельной электропроводности технологических вод ТЭС / Е.Н. Бушуев, Б.М. Ларин, А.Б. Ларин. 19.01.2015.

Бушуев Евгений Николаевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: bushuevEN@mail.ru

Бушуева Наталия Всеволодовна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@xste.ispu.ru

УДК 621.187.11

Е.Н. БУШУЕВ, д.т.н., профессор

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

Обоснование выбора предварительной обработки воды на ТЭС на основе метода ультрафильтрации

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния ряда факторов, позволяющие улучшить качество очистки природных вод на установке ультрафильтрации.

Ключевые слова: водоподготовка, мембранные методы, ультрафильтрация.

E.N. BUSHUEV, Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: admin@xste.ispu.ru*

Justification of the choice of water pretreatment to the power station on the basis of ultrafiltration

Abstract. The effect of a number of factors that improve the quality of natural water purification on ultrafiltration.

Key words: water treatment, membrane methods, ultrafiltration.

Имеющийся опыт эксплуатации установки обратного осмоса (УОО) свидетельствует о том, что основным фактором, от которого зависит удовлетворительная работа мембран, является соблюдение норм качества воды, подаваемой на эту установку. Анализ требований производителей показывает, что практически нет ограничений по концентрации солей, содержащихся в поверхностных водоисточниках, возможна работа установки в широком диапазоне показателя pH. Огра-

ничивается лишь содержание тех веществ, которые могут привести к отравлению или забиванию мембран. Фирмы-производители обратно-осмотических элементов оценивают качество обрабатываемой воды преимущественно коллоидным показателем SDI. Предельно допустимое SDI – 5, а при значениях SDI от 3 до 5 производители относят такие воды к проблемным, устойчивая работа обратноосмотического элемента гарантируется при SDI < 3, то есть при малом содержании коллоидных примесей.

Перспективным вариантом снижения индекса SDI в обрабатываемой воде западными фирмами-производителями, а вслед за ними и отечественными адаптерами является предварительная обработка исходной (природной) воды на установке ультрафильтрации (УУФ). Эта установка включает мембранные фильтрующие элементы с увеличенными по сравнению с УОО порами. Такое решение не отменяет, как правило и традиционной преточистки, требует дополнительных исследований на типичных природных водах в реальных отечественных промышленных установках.

Были проведены лабораторные испытания УУФ [1], как включенной перед установкой обратного осмоса. Некоторые результаты проведенных исследований представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что без использования коагулянта (проба №2) снижение растворённых органических веществ и соединений железа не велико, получаемый фильтрат не соответствует требованиям к поступающей воде на УОО.

Аналогичные исследования проведены на целом ряде отечественных ТЭС, расположенных в различных регионах России на водоёмах разной степени сложности, в том числе в период паводков и в период цветения водорослей и планктона [1, 2]. Исследования показали, что для эффективного использования УУФ в схемах водоподготовки на ТЭС, для получения гарантированного качества воды перед УОО необходима предварительная коагуляция исходной воды.

Таблица 1. Результаты лабораторных исследований УУФ

№	Водный поток	Щ _о , мг-экв/л	С _{Fe} , мкг/л	Ок, мгО/л	С _{Al} , мкг/л	SDI
1.	Исходная вода	3,15	269	6,08	8	–
2.	Фильтрат УУФ (без коагуляции)	3,05	236	6,24	7	>6,67
3.	Фильтрат УУФ (D _к =7 мгAl/л; τ=15 мин)	2,60	73	4,48	48	2,2
4.	Фильтрат УУФ (D _к =8 мгAl/л; τ=5 мин)	2,50	84	4,32	152	–

Примечание. D_к – доза вводимого коагулянта; τ – время контакта коагулянта с обрабатываемой водой

Существенное влияние на эффективность процесса оказывает полнота смешения реагентов с обрабатываемой водой, а также время

контакта. В ряде случаев применение перемешивания воздухом существенно улучшает процесс коагуляции. Время контакта коагулянта с водой после введения и перемешивания, при температуре обрабатываемой воды 28–35 °С, должно составлять не менее 10 мин до подачи на УУФ. Особенно длительное время контакта требуется при коагуляции технической воды, уже прошедшей обработку различного рода ингибиторами. Обеспечение необходимого времени контакта реагентов с водой может быть организовано за счет промежуточного бака, устанавливаемого после точки их ввода.

Установлено, что первичное хлорирование с дозой 0,5–1,0 мг/л по активному хлору существенно улучшает процесс и коагуляция возможна при меньших дозах. Однако, в случае применения хлорирования необходимо осуществлять связывание остаточного активного хлора для предотвращения повреждения мембран, чувствительных к нему.

Проведенные исследования показали, что применение технологии напорной ультрафильтрации с предварительной коагуляцией для очистки природной воды обеспечивает стабильное снижение окисляемости (рис. 1) и цветности исходной воды, получение воды удовлетворяющей требованиям к качеству питательной воды УОО. В качестве коагулянта возможно использование сульфата алюминия и полиоксихлорида алюминия или их смеси. Использование органических катионных флокулянтов позволяет уменьшить дозу коагулянта в 1,5 раза.

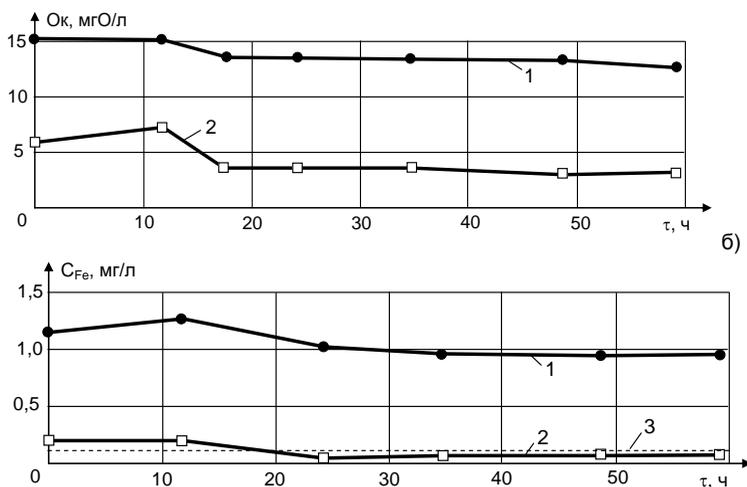


Рис. 1. Изменение показателей качества исходной воды (1) и фильтрата УУФ (2) в ходе экспериментов:

3 – нормируемое значение содержания соединений железа в питательной воде УОО

Были проведены также исследования влияния температуры воды на эффективность очистки на УУФ. Испытания проводились на подогретой воде, а также на холодной воде, при температуре 8–11 °С. В качестве коагулянта использовался сульфат алюминия. Проведенные опыты показали, что хотя процесс коагуляции на холодной воде протекает хуже, чем на подогретой, очистка методом ультрафильтрации остается стабильной при небольшом росте дозы коагулянта. При снижении температуры обрабатываемой воды увеличивается вязкость воды, в результате задерживающая способность мембран улучшается, что выгодно отличает метод ультрафильтрации от традиционных методов предочистки, где снижение температуры воды ведет к росту дозы реагентов и проскоку алюминия в осветленную воду.

Опыты показали, что оптимальным времени контакта на холодной воде является 15–20 мин. При уменьшении времени контакта менее 5 мин. происходит контактная коагуляция на мембране или внутри мембраны, также возможен проскок алюминия в фильтр.

Литература

1. **Жадан А.В.** Совершенствование технологии обработки воды на ТЭС на базе ионного обмена и мембранных методов // Дисс. на соиск. ... к.т.н. – Иваново, ИГЭУ, 2013. 193 с.
2. **Бушуев Е.Н., Жадан А.В.** Обоснование выбора схемы предварительной обработки воды на ТЭС на основе метода ультрафильтрации // Вестник ИГЭУ. 2014. № 2. С. 5–14.

Бушуев Евгений Николаевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: bushuevEN@mail.ru

УДК 621.321

Б.М. ЛАРИН, д.т.н., профессор;
Н.А. ЕРЁМИНА, к.т.н., доцент; А.Ю. БУДАЕВА, инженер

Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34
E-mail: vnekat@mail.ru; abdvalenka@mail.ru

Технологические решения для утилизации регенерационных вод установки химического обессоливания добавочной воды на ТЭС

Аннотация. Показана возможность отдельной утилизации маломинерализованных и высокоминерализованных регенерационных вод. Маломинерализованные стоки могут быть возвращены в технологический цикл, высокоминерализованные – упарены до увлажненных солевых остатков.

Ключевые слова: регенерация ионитов, утилизация сточных вод, удельная электропроводность.

B.M. LARIN Doctor of Engineering, professor,
N.A. EREMINA Candidate of Engineering, docent
A.Y. BUDAEVA student

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

Technological solutions for recycling regeneration water chemical installation desalting of additional water on TPP

Abstract. The possibility of separate disposal of low-mineralized and saline regenerative waters. Low mineralization of the effluent can be returned into the process cycle, saline - evaporated to moist salt residues.

Key words: regeneration of ion exchangers, waste water disposal, electrical conductivity.

Стоки химического цеха тепловой электростанции в значительной степени формируются водами взрыхляющих промывок, отработанными регенерационными растворами и отмывочными водами ионитных фильтров. Для установок химического обессоливания часть стоков содержит избыток кислоты, обычно серной кислоты, часть стоков – избыток щелочи, а нейтрализованный сток значительное количество солевых компонентов, нередко превышающих предельно-допустимые концентрации (ПДК) [1]. Обычно, перед сбросом в природные водоемы стоки химцеха смешиваются с общестанционным стоком, что позволяет снизить концентрации солей, однако, общий солевой сброс может превышать ПДК [2] и вызывать штрафные санкции со стороны контролирующих органов.

Экологические проблемы химводоочисток ТЭС являются одним из основных аргументов в пользу применения мембранных технологий водоподготовки в замен ионитных фильтров [2-5].

Вопросам утилизации стоков химводоочисток ТЭС и разработке малоотходных технологий посвящено много публикаций [5-7]. Тем не менее, большинство электростанций ограничивается нейтрализацией и разбавлением стоков химводоочистки. Одной из причин является высокая стоимость и недостаточная технологическая надежность предлагаемых проектных решений.

В данной работе предлагается простой метод сокращения объема минерализованных сточных вод обессоливающей установки на основе использования измерений электропроводности, с последующей раздельной утилизацией условно чистого и минерализованного стоков.

В качестве примера рассмотрена установка химического обессоливания Костромской ГРЭС (КГРЭС).

Исходная вода относится к типу маломинерализованных вод гидрокарбонатного класса. Содержание взвешенных веществ – невысокое, содержание железоорганических соединений – среднее. Сточная вода содержит высокие концентрации хлоридов и сульфатов.

Подготовка обессоленной воды на КГРЭС производится по схеме трехступенчатого химического обессоливания с блочным включением фильтров.

Было проведено технологическое испытание оборудования обессоливающей установки КГРЭС, в ходе которого получены выходные кривые регенерации катионитных ($H_3 - H_2 - H_1^{пр} - H_1^{осн}$) и анионитных ($A_3 - A_2 - A_1$) фильтров первого блока фильтров (БФ-1). Регенерация проводилась в штатном режиме оперативным персоналом химцеха.

Для уменьшения расхода воды на собственные нужды установки на КГРЭС предусмотрен отвод от фильтров вод взрыхляющей промывки в бак промстоков с последующей очисткой и возвратом в технологический цикл.

Кислотный сток, как и щелочной, может быть разделен на два потока: условно чистый сток с удельной электропроводностью менее 500 мкСм/см объемом около 140 м^3 и минерализованный сток с концентрацией солей Na_2SO_4 , CaSO_4 , MgSO_4 до 150 мг-экв/л и такой же концентрацией серной кислоты объемом 80 м^3 .

При наличии нескольких баков-нейтрализаторов, как на КГРЭС, появляется возможность собирать условно чистые стоки кислотной и щелочной регенерации в один бак-нейтрализатор, а минерализованные стоки кислотной и щелочной регенераций – в другой бак-нейтрализатор (рис. 1).

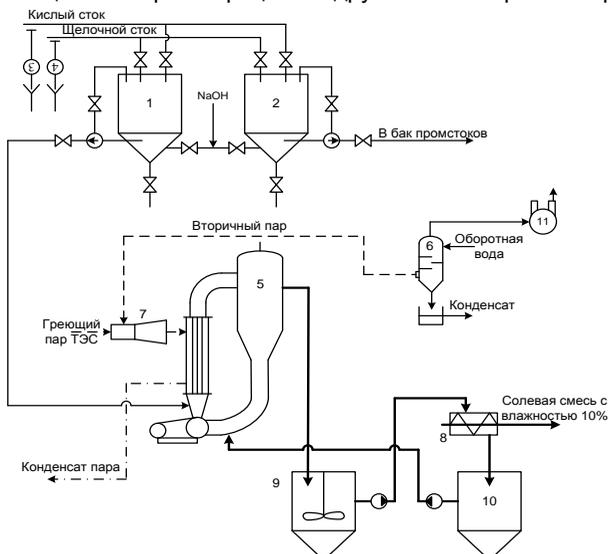


Рис. 1. Принципиальная схема разделения и утилизации регенерационных вод обессоливающей установки: 1, 2 – баки-нейтрализаторы химцеха; 3, 4 – датчики измерения удельной электропроводности; 5 – выпарной аппарат; 6 – конденсатор; 7 – паровой компрессор; 8 – центрифуга; 9 – бак с мешалкой; 10 – бак упаренного раствора; 11 – вакуумный насос

Нейтрализованный условно чистый сток объемом до 250 м³ с электропроводностью до 200 - 250 мкСм/см может быть направлен в бак промстоков для повторного использования. В другом баке-нейтрализаторе с минерализованным кислотно-щелочным стоком предполагается интенсивное образование осадка гипса CaSO₄, который может быть удален отстаиванием в баке-нейтрализаторе или другом специальном баке. После этого раствор может подаваться на выпарной аппарат, обеспечивающий выход увлажненных кристаллических солей, пригодных для транспортирования. Подобные проекты реализуются в теплотехнологиях, в том числе на ТЭС, например, на Стерлитамакской ТЭС в Башкирии по технологии НПП «Машпром» (г. Екатеринбург).

Таким образом, под контролем электропроводности стоков регенерации ионитных фильтров обессоливающей установки с блочным включением (КГРЭС) возможна раздельная утилизация маломинерализованных и высокоминерализованных регенерационных вод. Маломинерализованные стоки могут быть возвращены в технологический цикл, высокоминерализованные – упарены до увлажненных солевых остатков, пригодных к вывозу с ТЭС.

Литература

1. **Правила** охраны поверхностных вод (типовые положения). М.: Государственный комитет СССР по охране природы. 1991.
2. **Серебрянников Н.И., Преснов Г.В., Храмчихин А.М., Седлов А.С., Шищенко В.В., Ларин Б.М.** Стратегия защиты водоемов от сброса сточных вод ТЭС ОАО «Мосэнерго» // Теплоэнергетика. 1998. №7. С. 2-6.
3. **Ларин Б.М., Ларин А.Б.** Состояние технологии подготовки водного рабочего тела на отечественных ТЭС // Теплоэнергетика. 2014. №1. С. 75-78.
4. **Пантелеев А.А., Рябчиков Б.Е., Жадан А.В., Хоружий О.В.** Проектные решения водоподготовительных установок на основе мембранных технологий // Теплоэнергетика. 2012. №7. С. 30-36.
5. **Юрчевский Е.Б., Ларин Б.М.** Разработка, исследование и внедрение водоподготовительного оборудования для ТЭС с улучшенными экологическими характеристиками // Теплоэнергетика. 2005. №7. С. 30-36.
6. **Фейзиев Г.К.** Высокоэффективные методы умягчения, опреснения и обессоливания воды. М.: Энергоатомиздат. 1988. 192 с.
7. **Абрамов А.И., Елизаров Д.П., Ремизов А.Н., Седлов А.С., Стерман Л.С., Шищенко В.В.** Повышение экологической безопасности ТЭС. Уч. пособие для вузов. М.: Изд. МЭИ. 2002. 378 с.

Ларин Борис Михайлович

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@xhte.ispu.ru

Еремина Наталья Александровна

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: zavkaf@xhte.ispu.ru

Будаева Алена Юрьевна

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@xhte.ispu.ru

УДК 620.9:658.011.56

О.В. ЕГОШИНА, к.т.н., доцент; Аие Мин Латт, аспирант;
Н.А. МАКАРИШЧЕВА, магистр

Национальный исследовательский университет
«Московский энергетический институт»
111250, Россия, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14
E-mail: Makarishcheva-NA@yandex.ru

Исследование динамики системы автоматического дозирования аммиака в лабораторных условиях

Аннотация. На основе проведенных лабораторных исследований получена математическая модель системы дозирования аммиака, как объекта управления. Показано, что при использовании сигнала по показателю pH, по сравнению с сигналом по удельной электропроводности, система дозирования является не только более точной, но и более чувствительной по отношению к различным типам возмущений.

Ключевые слова: водно-химический режим, система автоматического дозирования, коррекционная обработка

O.V. YEGOSHINA, Candidate of Engineering;
EYYE MIN LATT, graduate;
N.A. MAKARISHCHEVA, master

Study of the dynamics of the automatic dosing of ammonia in vitro

Abstract. On the basis of laboratory studies the mathematical model of ammonia dosing system as the control object. It is shown that when using a pH indicator signal by comparison with the signal on the conductivity, the dosing system is not only more accurate but also more sensitive with respect to different types of disturbances.

Key words: water chemistry, automatic dosing, correctional treatment

На тепловых электрических станциях (ТЭС) зачастую используются системы дозирования реагентов «вручную» или дозирование осуществляется только по теплотехническому параметру, как правило, по расходу теплоносителя. В связи с этим повышенный интерес оперативного персонала ТЭС вызывает создание систем автоматического дозирования реагентов с учетом параметров химического контроля [1].

Одним из основных водно-химических режимов, используемых на ТЭС, в том числе на ПГУ, является аммиачный режим, который применяется в конденсатно-питательном тракте. Как правило, при ведении такого режима не предусматривается дополнительная коррекционная обработка котловой воды. Величина pH в барабане определяет за счет дозирования аммиака в питательную воду [2]. Ввод аммиака предупреждает коррозию металла котла и всего пароводяного тракта.

Поэтому каждый энергоблок с барабанным котлом высокого давления оборудован системами автоматического дозирования.

Подача аммиака осуществляется насосом-дозатором, который управляется контроллером, получающим аналоговые сигналы. Обычно автоматическое дозирование аммиака в питательный тракт выполняется по сигналу удельной электропроводимости питательной воды с коррекцией по значению рН. Применение параметра удельной электропроводимости повышает надежность системы, поскольку техника измерения удельной электропроводимости более проста и надежна, чем техника измерения рН.

При организации автоматического дозирования аммиака обязательно необходимо предусматривать сигнал по расходу обрабатываемой среды помимо автоматического контроля удельной электропроводимости и рН обрабатываемой воды[3].

Системы автоматического дозирования корректирующих реагентов позволяют облегчить работу оперативного персонала ТЭС и оптимизировать их подачу. На кафедре тепловых электрических станций Московского Энергетического Института разработан стенд по исследованию динамики химико-технологических процессов при дозировании корректирующих реагентов применительно к лабораторным условиям. Данная установка является физической моделью системы дозирования различных корректирующих реагентов, используемой на ТЭС. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

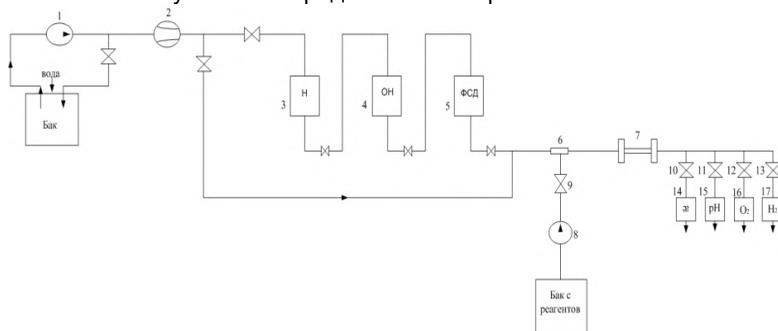


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема лабораторной установки дозирования корректирующих реагентов:

- 1- циркуляционный насос, 2- расходомер, 3- катионитовый фильтр,
- 4 –анионитовый фильтр, 5 - фильтр смешанного действия , 6- узел смешения,
- 7- образец, 8- насос дозатор, 9,10,11,12,13 – регулирующий клапан, 14- æ - кондуктометр, 15- рН – рН метр, 16 - O₂ –анализатор растворенного кислорода, 17- H₂ – анализатор растворенного водорода

Конструктивно установка представляет собой разомкнутый контур, с дистиллятором объемом 10 л и системой трехступенчатого обес-

соливания воды (3-5). Химически обессоленная вода смешивается с раствором аммиака постоянной концентрации. Затем обработанная вода проходит через экспериментальный участок (7) и подается на датчики анализаторов химического контроля (14-17), сливается в дренаж.

На данном стенде была выполнена серия экспериментов по исследованию влияния возмущений на характеристики переходных процессов по различным каналам регулирования. В результате эксперимента получены математические модели объекта управления, также переходные процессы в системе дозирования аммиака по pH и удельной электропроводимости обработанной воды (рис. 2).

Из рис. 2 видно, что переходный процесс по каналу «расход аммиака – электропроводимость» имеет динамическую ошибку в 6 раз выше по сравнению с переходным процессом по pH при одинаковом времени установления процесса, которое составляет около 300 с. Поэтому целесообразно применять в качестве управляемого сигнала величину pH.

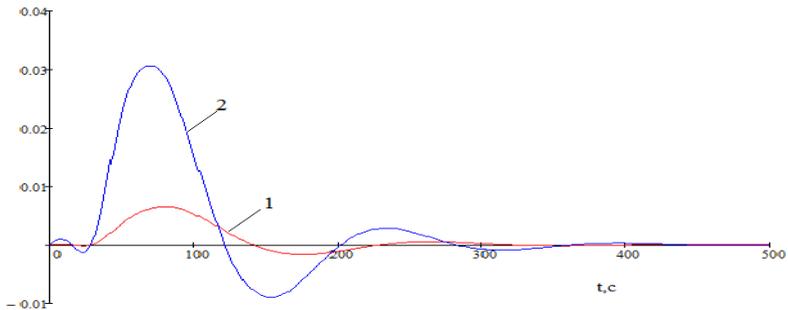


Рис. 2. Переходные процессы в системе автоматического дозирования аммиака по pH и электропроводимости при изменении расхода аммиака:

- 1- переходный процесс в системе автоматического дозирования аммиака по pH;
- 2- переходный процесс в системе автоматического дозирования аммиака по pH

Кроме того, рассчитывалась концентрация аммиака в обработанной воде на основе данных автоматического pH-метра:

$$pH = -\lg C_{H^+} = -\lg \frac{10^{-14}}{\sqrt{K_{NH_4OH} \cdot C_{NH_4OH}^p}},$$

где $K_{NH_4OH} = 1,75 \cdot 10^{-5}$ - константа диссоциации NH_4OH при $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$;

C_{H^+} - концентрация ионов водорода, моль/дм³;

$C_{NH_4OH}^p$ - расчетная концентрация аммиака в обрабатываемой воде, моль/дм³.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований показали, что к использованию электропроводности в качестве управляемого сигнала в системах автоматического дозирования аммиака следует относиться осторожно, поскольку при расчетах системы дозирования аммиака использование электропроводности приводит к большим динамическим ошибкам при одинаковом времени процесса. С этой точки зрения системы дозирования аммиака по рН могут оказаться не только более точными, но и более чувствительными по отношению к различным типам возмущений, как внешних, так и внутренних.

Литература

1. Егошина О.В., Воронов В.Н., Назаренко П.Н. Разработка автоматического регулирования дозирования гидразина в СХТМ // Теплоэнергетика. 2007. № 7. С. 25–27.
2. Воронов В.Н., Петрова Т. И. Совершенствование водно-химических режимов и химконтроля на тепловых электростанциях. Теплоэнергетика. № 7. 2010. С. 2–6.
3. Егошина, О. В. Инженерные расчеты в системах химико-технологического мониторинга: учеб. пособие / О. В. Егошина. - М.: Изд-во МЭИ, 2013. - 49 с.

Егошина Ольга Вадимовна,
ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский университет "МЭИ",
e-mail: YegoshinaOV@mpei.ru

Айе Мин Латт,
ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский университет "МЭИ",
E-mail: Makarishcheva-NA@yandex.ru

Макаришцева Наталья Алексеевна,
ФГБОУ ВПО "Национальный исследовательский университет "МЭИ",
E-mail: Makarishcheva-NA@yandex.ru

УДК 621.321

Е.В. ЗАЙЦЕВА, к.т.н., доцент; И.А. ШАТОВА, к.т.н.

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

Выбор технологии эксплуатационной очистки внутренних поверхностей котла

Аннотация. Обоснована необходимость проведения эксплуатационной очистки внутренних поверхностей нагревателя. Приведены результаты выполненной в ходе испытаний индивидуальной проверки кислотных ингибированных моющих растворов.

Ключевые слова: эксплуатационная очистка, энергетический котел, водно-химический режим.

E.V. ZAITSEVA Candidate of Engineering, docent,
I. A. SHATOVA Candidate of Engineering

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

A fabric stretching control on continuous plant electric drive system

Abstract. The necessity of realization of the operating cleaning of internal surfaces of heating is reasonable. Results over of the individual verification of acid ингибированных wash-liquors executed during tests are brought.

Key words: operating cleaning, power caldron, water-chemical mode.

Образование отложений и накипи в котлах неизбежный процесс. Отложения имеют малую теплопроводность и ухудшают теплопередачу. При появлении отложений происходит перегрев металла. Становится возможным образование отдулин, язв, трещин и, как следствие, разрыв теплообменных труб. Для предотвращения их износа и разрушения в процессе эксплуатации необходимы химические очистки этих труб. Своевременно и качественно выполненная эксплуатационная очистка котла способствует также уменьшению выноса в проточную часть турбины «пылевых» частиц отложений, отслаивающихся при резких изменениях теплогидравлического режима котла.

Скорость образования отложений на внутренних поверхностях теплообменных труб в процессе эксплуатации зависит от вида сжигаемого топлива и конструкционных особенностей котла, обуславливающих тепловые нагрузки, от водно-химического режима котла. На количество и состав эксплуатационных отложений существенное влияние оказывает количество пусков и остановов котла, эффективность проводимых во время остановов мероприятий по его консервации.

Технология и схема эксплуатационной очистки котла должны обеспечивать высокое качество очистки при минимально возможных материальных и временных затратах на очистку и обезвреживание сбросных вод. При выборе технологии эксплуатационной очистки необходимо учитывать конструкционные особенности котла [1].

В частности, в конкретных условиях при выборетехнологии эксплуатационной химической очистки труб испарительных экранов котла ТПЕ-208 оказалось необходимым:

- совместить очистку относительно мало загрязнённых труб испарительных экранов чистого отсека и значительно локально загрязнённых труб солевого отсека. Трубы чистого отсека могут быть очищены как химически простыми моющими растворами, так и парохимически при пароводокислородной обработке;

- обеспечить удаление плотных локальных отложений шлама, так как под их остатками продолжится развитие подшламовых язв;

- эффективного ингибирования коррозии при очистке из-за практического отсутствия пассивирующей плёнки на дне язв под отложениями шлама и наличием микротрещин межкристаллитной коррозии в стали по контуру язв;

- не допустить омеднение очищенной стали, которое возможно из-за большой массовой доли соединений меди в отложениях. Омеднение стали провоцирует гальванокоррозию с анодным растворением железа.

Исследование химического состава бугорчатых отложений шлама показало существенное превышение массовой доли меди в них в сравнении с равномерными отложениями. Этот факт соответствует переходу меди из котловой воды в шламовые отложения в катодном процессе. При этом медистые отложения формируются даже при малой концентрации соединений меди в питательной воде котла (в конденсате перед деаэратором питательной воды).

В группу кислотных моющих средств, находящихся спрос в энергетике России и характеризующихся как эффективные, входят Дескалер и МСК (ЗАО "ГД ХЕМИКС", Белоруссия), AugePROAc (Россия, Казань, ООО «ПК МАХИМ»).

В ходе испытаний выполнена индивидуальная проверка кислотных ингибированных моющих реагентов Дескалер и МСК, AugePROAc60, AugePROAc55, разбавленных бидистиллятом в соотношениях (1:7) и (1:15). Образцы труб не подвергались предварительной аммиачной обработке, которая могла бы улучшить результаты пробных очисток. Пробные кислотные очистки выполнены в нагретых неподвижных и подвижных растворах.

В результате установлено, что для удаления бугорчатых медь-содержащих железоксидных отложений очистку труб проводить:

- при разбавлении реагентов водой в соотношении 1:7;

- при максимальной допустимой температуре кислотного раствора, установленной производителем (поставщиком) реагента.

После очистки труб кислотными растворами необходимо предусмотреть дополнительную стадию удаления восстановленной меди.

В качестве последнего этапа очистки труб от медистых бугорчатых отложений следует предусмотреть нейтрализацию и пассивацию труб с использованием аммиака. Эти операции явятся контрольной стадией удаления соединений меди.

Для обеспечения полноты удаления бугорчатых железоксидных отложений целесообразно:

- увеличить длительность кислотной стадии до 6 дней. Эффективные ингибиторы коррозии, входящие в состав указанных моющих кислотных реагентов, создают условия для продления этой стадии очистки труб;

- выполнить последующие нейтрализацию и пароводокислородную доочистку и пассивацию труб по технологии ВТИ.

Очистка труб испарительных экранов котла от бугорчатых медистых уплотнившихся отложений шлама может быть реализована в несколько последовательных стадий после аммиачной предварительной обработки труб: 1) обработка внутренней поверхности труб реагентом АугеPROAc60 для удаления наружных слоёв отложений, содержащих основную массу соединений меди, без их осаждения на сталь; 2) последующая обработка внутренней поверхности труб реагентами АугеPROAc55 или МСК для удаления оставшихся на них отложений; 3) нейтрализация и контрольная проверка эффективности очистки (очистка) от меди аммиачным раствором.

Результаты исследований образцов труб котлов ТПЕ-208, лабораторных проверок технологической эффективности кислотных моющих реагентов, опыт эксплуатационных химических очисток и пароводокислородных обработок (очисток и пассиваций) подтверждают эффективность технологии эксплуатационной очистки циркулирующим раствором реагента АугеPROAc60 с последующей пароводокислородной обработкой труб испарительных экранов с бугорчатыми медистыми отложениями.

Литература

1. Нормы расхода реагентов для предпусковых и эксплуатационных химических очисток теплоэнергетического оборудования электростанций» (НР 34-70-068-83), Союзтехэнерго, М., 1985 г.

Зайцева Екатерина Владимировна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: yekoz@mail.ru

Шатова Ирина Анатольевна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: yekoz@mail.ru

УДК 621.321

Н.А. ЕРЕМИНА, к.т.н., доцент; И.А. ШАТОВА, к.т.н.;
А.Ю. БУДАЕВА, магистрант

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

Особенности нормирования, контроля и ведения водно-химического режима котла-утилизатора ПГУ с каскадной схемой непрерывной продувки

Аннотация. Показана необходимость режимно-наладочных теплохимических испытаний при изменении технологии коррекционной обработки водопароводяного тракта паро-газовой установки

Ключевые слова: водно-химический режим, котел-утилизатор, непрерывная продувка, хеламин, фосфатирование котловой воды

N.A. EREMINA Candidate of Engineering, docent

I.A.SHATOVA Candidate of Engineering

A.Y. BUDAEVA student

Ivanovo State Power Engineering University

153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: zavkaf@xxte.ispu.ru

Features of regulation, control and management water Chemistry of the waste heat boiler PSU with a cascade circuit of a continuous purge

Abstract. Shows the need for performance adjustment heat-chemical testing if the technology changes and correctional treatment water water-steam path steam-gas installation.

Key words: water chemistry, waste heat boiler, a continuous purge, helamin, phosphate boiler water.

При проектировании систем ведения водно-химического режима (ВХР) котлов-утилизаторов (КУ) парогазовых установок (ПГУ) учитываются требования СТО 70238434.27.100.013-2009[1]. При установлении требований к качеству питательных и котловых вод с опорой на этот документ требуется учёт ряда обстоятельств. В СТО отсутствуют необходимые для этого комментарии.

Во многих случаях, в соответствии с [1], принят режим коррекционной обработки питательной воды КУ, названный АСР («аминосодержащий» режим). При этом в качестве аминосодержащей композиции нейтрализующих и плёнообразующих реагентов часто используется хеламин, композиция иностранного производства. Изменения экономической политики в России вызвали потребность в отечественной разработке аминосодержащей композиции (композиций) или возврата к «классике», к использованию для коррекционной обработки питательных вод, например, аммиака, гидразина, для коррекционной обработки котловых вод–фосфатов, гидроксида натрия. В конкретных условиях при проектировании ПГУ приняты и используются как АСР, так и альтернативные «классические» технологии ведения ВХР. При этом эксплуатационный опыт показывает соответствие «классических» реагентов требованию ПТЭ, как средство ведения ВХР они способствуют надёжности и экономичности (следует добавить, и безопасности) теплоэнергетического оборудования ТЭС.

В качестве примера неполного учёта обстоятельств при проектировании систем ведения ВХР КУ можно указать на нормирование массовой концентрации хлоридов в питательной воде (не более 3 мг/дм³). Такое нормирование соответствует прогрессивному принципу профилактичности контроля. Тем не менее, для АЭС с ВВЭР из-за склонности

аустенитной нержавеющей стали к коррозионному растрескиванию в присутствии хлоридов нормируют их концентрацию в воде парогенератора (при наличии системы очистки турбинного конденсата: блок ст. № 1 Ростовской АЭС 100 мкг/дм³, блок ст. № 2 этой же АЭС 30 мкг/дм³), а не в питательной воде. При контроле качества воды парогенератора (котловой воды) обеспечивается получение представительного результата измерений, используемого при регулировании продувочного режима. Естественно, лучше получить раннее предупреждение о поступлении увеличенных количеств хлоридов в парогенератор, но для этого надо контролировать качество питательной воды.

Относительная погрешность определения доступными средствами концентрации хлоридов в питательных водах парогенератора АЭС с ВВЭР и котла-утилизатора велика, а использование дорогостоящих приборов определения микроконцентраций экономически нецелесообразно. Разумным решением является переход к определению хлоридов в котловой воде, хотя и в этом случае надо доказать его необходимость: экономайзеры и контуры циркуляции котлов-утилизаторов сделаны из перлитных сталей.

Нормативное максимальное допустимое значение массовой концентрации натрия в паре барабанного котла-утилизатора (10 мкг/дм³) больше, чем в его питательной воде (5 мкг/дм³) при обработке питательной воды аминоксодержащими веществами. В подтверждение данному нормативу требуется комментарий. Как правило, пар по фактическому качеству не уступает питательной воде.

Если источником питательной воды контуров низкого и высокого давлений является их общий деаэратор, существует неопределённость в нормировании качества котловых вод и установлении объёма химического контроля. Имеется реальная возможность упростить контроль качества питательной и котловой вод контура низкого давления. Но при этом упрощать химический контроль качества пара низкого давления не следует: ужесточение норм качества пара в 1983 г. было произведено Минэнерго для предотвращения повреждений лопаток турбин в зоне фазового перехода.

При каскадной схеме непрерывной продувки (отведение воды из барабана высокого давления в барабан низкого давления и далее в сепаратор непрерывной продувки) и одинаковом относительном значении её расхода для контуров котла-утилизатора, одинаковом качестве питательных вод качество котловой воды низкого давления хуже, чем качество котловой воды высокого давления.

Относительное значение расхода продувочной воды контура низкого давления при подаче продувочной воды контура высокого давления в барабан низкого давления, например, при проектировании или при контроле расходомера продувки приходится определять в долях единицы по формуле:

$$P_{нд} = [(C_{пит в} - C_{нпнд}) + D_{првд} / D_{нд} (C_{првд} - C_{пит в})] / (C_{прнд} - C_{пит в}),$$

где $C_{\text{пит в}}$ - концентрация примеси в питательной воде; $C_{\text{нпнд}}$ – концентрация примеси в насыщенном паре из барабана низкого давления; $D_{\text{првд}}$ – расход продувочной воды контура высокого давления, т/ч; $D_{\text{пнд}}$ – расход пара из барабана низкого давления, т/ч; $C_{\text{првд}}$ – концентрация примеси в продувочной воде контура высокого давления; ($C_{\text{прнд}}$ - концентрация примеси в продувочной воде контура низкого давления).

Таким образом, очевидна целесообразность отступления от требований [1] при разработке карты по ведению ВХР с опорой на результаты тепло-химических испытаний и опытно-промышленной эксплуатации. Подтверждение этому получено авторами при обследовании ВХР котла-утилизатора одной из ПГУ.

Планируя переход от АСР котлов-утилизаторов к другим режимам, следует учесть ряд существенных факторов. Первым из них является конструктивный. Ввод фосфатов осуществляется в барабан котла. Тем самым обеспечивается образование гидроксилпатита и защита испарительных труб парового котла от накипеобразования. При использовании фосфатирования котловых вод следует либо создать условия для ввода фосфатов в барабан КУ, включая наличие у барабана трубопровода фосфатирования, необходимое значение pH котловой воды, малую жесткость питательной воды, либо отказаться от него. Необходимым условием для фосфатирования является гидравлическая плотность конденсаторов и (или) наличие системы обессоливания турбинного конденсата. Имеется положительный опыт эксплуатации паровых котлов и КУ без фосфатирования котловой воды. Возможность перевода КУ к эксплуатации без обработки питательной воды хеламином и без фосфатирования котловой воды создаётся при выполнении требований [1] к качеству питательной воды.

Нейтрализующее действие хеламина может быть заменено нейтрализующим действием аммиака, в том числе, образовавшегося из гидразина. Об этом свидетельствует свобода выбора ВХР котлов-утилизаторов, предоставленная [1]. Трудность ведения режима котловой воды:

- заключается в обеспечении нормативного значения pH_{25} котловой воды;

- обусловлена различием коэффициентов распределения аминов и аммиака в системе «вода – насыщенный пар» и необходимостью её подщелачивания гидроксидом натрия.

При отсутствии трубопровода (трубопроводов) дозирования реагентов в барабан КУ ввод гидроксида натрия в его питательную воду при наличии устройств внутрибарабанной промывки пара может привести к недопустимому ухудшению качества пара по показателю «массовая концентрация натрия».

Дополнительная трудность при переходе от АСР к другим ВХР КУ возникает при сопутствующем отказе от гидразинной обработки воды в связи с его токсичностью. Эта трудность заключается в необходимости

подбора технологии консервации котла-утилизатора. Однако и в данном случае найдутся альтернативы «хеламиновой» и гидразинной консерваций (ГРП, ГРО, ГВ [2]). Совместима с альтернативными ВХР и вполне доступна пароводокислородная обработка внутренних поверхностей котла, разработанная ВТИ [3] и другие методы консервации [2, 4].

Доклад содержит материалы, обобщающие наладочный и эксплуатационный опыт ведения ВХР (АСР и других) котлов-утилизаторов ипоказывающие необходимость проведения режимно-наладочных тепло-химических испытаний при изменении технологии коррекционной обработки вод пароводяного тракта ПГУ.

Литература

1. **Водоподготовительные** установки и водно-химический режим ТЭС. Условия создания. Нормы и требования. СТО 70238434. 27.100.013-2009. – М.: Изд. ИНВЭЛ, 2009.
2. **Методические** указания по консервации теплоэнергетического оборудования. РД 34.20.591-97. – М.: ОАО «Фирма ОРГРЭС», ОАО «ВТИ», 1997.
3. **Методические** указания по эксплуатационной пароводокислородной очистке и пассивации внутренних поверхностей энергооборудования. СТО ВТИ 37.005-2013.
4. **Методические** указания по консервации теплоэнергетического оборудования с применением плёнкообразующих аминов. РД 34.20.596-97. Дополнение к РД 34.20.591-97. – М.: МЭИ, ВНИИ АМ, ЗАО «Наука», 1998.

Еремина Наталья Александровна

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: zavkaf@xhte.ispu.ru

Шатова Ирина Анатольевна

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@xhte.ispu.ru

Будаева Алена Юрьевна

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@xhte.ispu.ru

УДК 621.321

А.Б. ЛАРИН, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru

Развитие автоматического химического контроля водного режима на ТЭС

Аннотация. Ужесточение норм, предъявляемых к качеству водного теплоносителя ТЭС, и развитие автоматических систем химического мониторинга за водно-химическим режимом требуют расширения диагностических возможностей систем мониторинга ТЭС. Использование наиболее точных измерений

показателей качества теплоносителя, таких как удельная электрическая проводимость и pH повышает надежность работы котельных установок и позволяет проводить диагностику состояния водного режима. Такое направление принято и в энергетике западных стран.

Ключевые слова: водно-химический режим ТЭС, удельная электропроводность, математическая модель, нормы качества теплоносителя, автоматический химконтроль.

A.B. LARIN, Candidate of Engineering, docent

Ivanovo State Power Engineering University
153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: yaandy_81@mail.ru

Development of automatic chemical control of the water regime on the TPP

Abstract. The tightening of norms for water coolant TPP and the development of automated systems of chemical monitoring of water-chemical regime requires expansion of the diagnostic capabilities of monitoring systems of TPPs. Using the most accurate measurement of quality parameters of the heat carrier, such as electrical conductivity and pH increases operation reliability of boiler plants.

Key words: water-chemical mode TPP, conductivity, mathematical model, standards for the quality of the heat-carrier, automatic chemcontrol.

В рамках данной работы, состоящей в совершенствовании обработки и химконтроля водного теплоносителя на ТЭС в условиях эксплуатации традиционных, новых и перспективных энергоблоков при восполнении потерь водой с повышенным содержанием органических примесей, можно заключить следующее:

1. Решением обобщенной математической модели ионных равновесий в водных растворах в частных условиях работы отдельных видов основного и вспомогательного оборудования ТЭС, разработаны практические алгоритмы контроля и управления водно-химическим режимом, составлены оригинальные методики. Решение математической модели (ММ) ионных равновесий в граничных условиях питательной воды энергетических котлов в этом случае обеспечивает косвенное определение концентраций аммиака, хлоридов, катионов жесткости и натрия в пересчете на натрий, что подтверждено патентом на изобретение и многочисленными лабораторными и промышленными испытаниями, некоторые из них приведены в табл. 1. Концентрация аммиака рассчитывается в среднем с 5-10 %-ным отклонением от аналитически измеренных аналогов. Показатель $[Na^+]_{\text{ср}}$ объединяет концентрации Na^+ и общей жесткости, величина которой может существенно превышать $[Na^+]$. С использованием такого алгоритма разработана конструкция промышленного анализатора минеральных примесей конденсата АПК-051 (совместно с НПП «Техноприбор» (г. Москва) [1]).

Таблица 1. Расчет концентраций ионных примесей питательной воды и пара энергетических котлов СВД и СКД

ТЭС, котел, дата	Измеренные параметры			Расчетные параметры			
	χ_{H^+} , мкСм/см	$\chi_{\text{NH}_4^+}$, мкСм/см	pH	$[\text{NH}_3]$, мкг/дм ³	$[\text{Cl}^-]$, мкг/дм ³	$[\text{Na}^+]_{\text{усл}}$, мкг/дм ³	$[\text{NH}_3]$, мкг/дм ³
ИвТЭЦ-3 (17.03.10)	3,87	0,31	9,18	-	20,5	11,86	427
	3,91	0,17	8,99	-	14,51	6,37	432
Северо- Западная ТЭЦ С.-Петербурга П-90 (01.08.13)	8,01	0,18	9,47	-	10,3	6,77	1261
	8,04	0,19	9,47	1400	10,9	7,15	1270
Гусино- Озерская ГРЭС Бл-2 22.08.13	4,05	0,4	9,1	486	22,9	15,49	450
	3,22	0,45	9,1	-	25,8	17,54	326
Саранская ТЭЦ- 2 Бл-2 (12.11.02)	5,42	0,9	9,2	700	51,5	37,18	698
	3,97	0,9	8,9	500	51,5	37,17	446
ТЭЦ-26 "МЭ" Бл-1, ТГМЕ-96Б (14.11.05)	6,64	0,92	9,42	-	52,7	38,10	950
	4,44	0,72	9,13	-	41,2	29,07	518
Конаковская ГРЭС Бл-6 (27.03.07)	0,195	0,183	7,64	-	10,5	6,39	12
	0,196	0,187	7,62	-	10,7	6,54	12
Пермская ГРЭС Бл-1, 2 (28.10.09)	0,28	0,08	7,99	-	4,6	2,72	18
	0,27	0,09	7,99	-	5,2	3,09	18

2. На базе штатного объема АХК, прежде всего, измерений электропроводности и pH в питательной, котловой воде и паре барабанного котла СВД ($P_6=13,8$ МПа), разработан новый метод определения нормируемых и диагностических показателей отличающийся тем, что впервые в качестве базового параметра состояния водного режима использовано измерение электропроводности Н-катионированной пробы котловой воды (χ_{H^+} , с.о) что обеспечило, вместе с прямыми измерениями χ , χ_{H^+} , pH косвенные измерения аммиака, хлоридов, натрия (условно-го) в питательной воде и фосфатов, солесодержание – в котловой воде. Метод внедрен на котле ТП-87 (ст.№ 3) Ивановской ТЭЦ-3, защищен патентом на изобретение РФ и получил высокую оценку на всемирном инновационном салоне в Брюсселе (Бельгия, 2011 г.) и был представлен на конференции Международной ассоциации по свойствам воды и водяного пара (IAPWS) в Лондоне (Англия, 2013 г.).

3. Разработана и проверена на энергоблоках ПГУ Северо-Западной ТЭЦ (г. Санкт-Петербург), ГТЭС «Терёшково» (г. Москва), Минской ТЭЦ-5 (г. Минск) методика косвенных определений концентраций нормируемых показателей аммиачно-гидразинного водного режима, обеспечивающая непрерывный контроль качества питательной, котловой воды и пара. Проведено обследование состояния ВХР энергоблока ГТЭС «Те-

решково», где выявлены отклонения как в измерительной системе, так и водно-химическом режиме. Установлено несоответствие рекомендаций СТО ВТИ-2009 по нормированию значений рН и аммиака питательной воды котла-утилизатора, что видно из данных табл. 2.

4. Проведено исследование ВХР энергоблоков СКД ряда ТЭС с прямоточными котлами. Показано, что в режимах работы с переменной нагрузкой поддержание высокого качества конденсата и питательной воды, соответствующего требованиям СТО ВТИ-2009, возможно при обеспечении эффективной работы БОУ и надёжного автоматического химконтроля. В зависимости от плотности конденсаторов паровых турбин и режима работы энергоблока объём очищенного конденсата на БОУ может составлять от 1 до 4-5 млн м³ при значениях удельной электропроводности 0,1 мкСм/см и ниже. Остаточная концентрация органических примесей в конденсате после БОУ меньше в случае использования ФСД и может составлять 4-5 мкгС/дм³ по общему органическому углероду по сравнению с использованием раздельного Н-ОН-ионирования с остаточным ООУ более 10-15 мкгС/дм³.

Таблица 2. Показатели качества питательной воды котлов-утилизаторов энергоблоков ПГУ при гидразин-аммиачном водном режиме с дозировкой NaOH

Энергоблок, дата контроля	$\chi_{\text{с}}^{25}$, мкСм/см	$\chi_{\text{н}}^{25}$, мкСм/см	рН	$[\text{NH}_3]_3$, мкг/дм ³	$[\text{СГ}]$, мкг/дм ³
ПГУ-450Т, С.-З. ТЭЦ, г. С.-Петербург, 28.07.2013	8,01 7,98	0,21 0,18	9,45 9,47	1241 1250	17,0 10,3
ПГУ-425, Минская ТЭЦ-5, 04.09.2012	9,20	0,30	9,52	1600	17,2
ПГУ-220, ГТЭС «Терешково», г. Москва, 10.10.2012	3,24 3,23	0,32 0,30	8,4 8,42	423 422	16,0 13,5

5. Разработан с участием автора и использован фирмой-производителем метод калибровки рН-метров в условиях сверхчистой среды энергоблоков ТЭС. Проведённое исследование показывает, что признаком повышенного содержания в питательной воде органических потенциально-кислых веществ можно считать увеличение электропроводности острого пара по сравнению с питательной водой более, чем на 0,2-0,3 мкСм/см и уменьшение величины рН на 0,1 единицу рН. Предложена простая формула пересчёта измеренных значений электропроводности на концентрацию условной уксусной кислоты. Предложенные способы защищены патентами на изобретение РФ. Расчетное уравнение имеет вид

$$C_{\text{ук}} = 153,6 \cdot (\chi_{\text{н,ов}} - \chi_{\text{н,пв}}),$$

где $C_{ук}$ – концентрация уксусной кислоты, мкг/л; $\chi_{н,оп}$, $\chi_{н,пв}$ – удельная электропроводность охлажденных проб острого пара и питательной воды, мкСм/см.

6. Решением обобщенной ММ ионных равновесий разработаны частные расчетные методики, положенные в основу новых приборных систем АХК, обеспечивающих прямые и косвенные измерения в проточной охлажденной пробе ряда основных нормируемых показателей ВХР. Совместно с НПП «Техноприбор» (г. Москва) разработаны промышленные образцы приборов АХК нового поколения (АПК-051, АПК-Лидер), конкурентно-способные с импортными автоматическими анализаторами «FAM Deltacon pH» и «AMI Deltacon Power». Приборные системы оформлены патентами на изобретение РФ [1].

Литература

1. Ларин Б.М., Ларин А.Б., Колегов А.В. Измерение электропроводности и pH в системах мониторинга водного режима ТЭС. Иваново. ИГЭУ. 2014. 332 с.

Ларин Андрей Борисович

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: yaandy_81@mail.ru

УДК 621.321

А.Б. ЛАРИН, к.т.н., доцент;
А.Я. СОРОКИНА, инженер

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: yaandy_81@mail.ru

Испытание импортозамещающих автоматических анализаторов качества водного теплоносителя для энергоблоков ТЭС и АЭС

Аннотация. Внедрение приборов автоматического химического контроля и автоматических анализаторов для контроля качества водного теплоносителя на ТЭС является одной из современных задач теплоэнергетики. В этих условиях необходимо создание импортозамещающих отечественных приборных систем и анализаторов не уступающих зарубежным аналогам. Такой анализатор создается научным коллективом кафедры ХХТЭ ИГЭУ совместно с фирмой «Техноприбор» г. Москва.

Ключевые слова: удельная электропроводность, математическая модель, нормы качества теплоносителя, питательная вода

A.B. LARIN, Candidate of Engineering, docent,
A.Ya. SOROKINA student

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: yaandy_81@mail.ru

Test automatic import substitution quality analyzers water coolant for thermal and nuclear power plants

Abstract. The introduction of automatic chemical control devices and automatic analyzers for quality control of the water coolant to the power station is one of the tasks of modern power system. In these circumstances, it is necessary to create import-substituting domestic instrument systems and analyzers are not inferior to foreign analogues. This analyzer is created scientific team ISPU cooperation with the firm " Tehnopribor " Moscow.

Key words: conductivity, mathematical model, standards for the quality of the heat-carrier, feedwater

Разработка является импортозамещающим решением анализатора западноевропейской фирмы «SWAN» - «FAM Deltoson pH», появившегося на приборном аналитическом рынке в конце прошлого века. Преимуществом такого прибора были измерения в одном потоке охлажденной пробы двух нормируемых показателей – удельной электропроводности прямой пробы (χ) и удельной электропроводности Н-катионированной пробы (χ_N), а так же расчетное определение показателя pH. Недостатком является отсутствие автоматической индикации момента срабатывания Н-колонки, завышение требований к составу примесей анализируемой среды и невозможность определения pH в нейтральной и слабокислой средах.

Предложенный способ основан так же на измерениях удельной электропроводности прямой (χ) и Н-катионированной пробы (χ_N), дополненных измерением pH пробы.

Измеренные данные отвечают нормам СТО ВТИ-2009 и используются в аналитическом алгоритме, основанном на решении математической модели ионных равновесий в граничных условиях качества конденсата, пара и питательной воды энергетических котлов СВД. Результатом работы прибора являются:

- прямые измерения нормируемых показателей качества χ , χ_N , pH;
- косвенные (расчетные) определения нормируемых и диагностических показателей: концентрации аммиака, хлоридов, натрия.

Такой прибор способен производить измерения в щелочной среде как «FAM Deltoson pH», а так же в нейтральной и слабокислой среде без дозирования подщелачивающего агента, что обеспечивает его использование на энергоблоках ГРЭС с нейтральным водным режимом. Измерительный блок обеспечивает сигнализацию момента срабатыва-

ния Н-колонок за счет использования двух последовательных Н-колонок и двух измерений удельной электропроводности $\chi_{Н1}$ и $\chi_{Н2}$.

Расчетный алгоритм и способ косвенного определения концентраций аммиака, хлоридов, гидрокарбонатов и натрия изложен ранее и защищен патентом на изобретение [1]. Техническая реализация предложенного способа АХК и конструктивное исполнение осуществлено НПП «Техноприбор» (г. Москва) в виде анализатора АПК-051.

Наряду с этим авторами предлагается новый способ косвенного определения показателя рН, концентраций аммиака, хлоридов, натрия (условного), основанный лишь на измерениях удельной электропроводности прямой (χ) и Н-катионированной ($\chi_{Н}$) проб питательной воды и пара. Способ основан на решении общей ММ ионных равновесий вод типа конденсата в граничных условиях качества питательной воды и пара.

Способ реализуется следующим образом (рис. 1). Пробу пара, конденсата пара или питательной воды энергоблока с параметрами рабочей среды непрерывным потоком подают на устройство подготовки пробы – УПП, где охлаждают обратной водой и снижают давление. Краном 2 устанавливают расход пробы в пределах паспортных значений используемого кондуктометра, через датчики которого 3, 4 и Н-катионитовую колонку 5, расположенную в потоке пробы между датчиками, непрерывным потоком пропускают охлажденную пробу – предельноразбавленный малобуферный водный раствор. Датчиками 3 и 4 измеряют удельную электрическую проводимость (электропроводность) и температуру пробы, а измеренные значения с заданной дискретностью поступают в обрабатывающий блок 6, где производят обработку сигналов до количественного значения рН контролируемой пробы и концентраций ионных примесей воды.

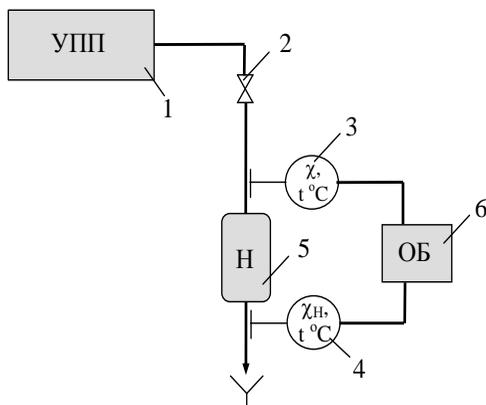


Рис. 1. Принципиальная схема приборного комплекса

В качестве примера в табл. 1 приведены результаты аналитических измерений по схеме рис. 1 и определения по предложенному способу значений рН предельно разбавленных водных растворов как с дозировкой аммиака (поз. 1-3), так и без дозировки аммиака (поз. 4-7). Использование предложенного способа для питательной воды энергоблоков ТЭС с прямоточными котлами сверхкритического давления (СКД) приведены в табл. 2.

Таблица 1. Измеренные и расчётные значения контролируемых показателей качества воды типа конденсата

№ пробы	Измеренные величины				Расчётная величина	
	X мкСм/см	X _н мкСм/см	рН	[NH ₃] мкг/дм ³	рН	[NH ₃] мкг/дм ³
1	8,04	0,19	9,47	1400	9,47	1397
2	5,42	0,90	9,2	700	9,24	744
3	2,85	0,90	9,0	318	8,90	300
4	0,28	0,27	7,8	отс	7,87	отс
5	0,27	0,152	7,9	отс	7,93	отс
6	0,164	0,204	6,8	отс	6,77	отс
7	0,142	0,189	6,52	отс	6,58	отс

Результат предлагаемого способа обеспечивается использованием надежных и достоверных измерений удельной электропроводности малобufferных предельно разбавленных растворов типа конденсата вместо потенциометрических измерений ЭДС пары электродов и учетом количественной связи этих измерений с показателем рН.

Таблица 2. Измеренные и расчётные значения контролируемых показателей качества питательной воды прямоточных котлов ТЭС по измерениям удельной электропроводности охлажденных проб

	Измеренные величины			Расчётная величина
	X, мкСм/см	X _н , мкСм/см	рН	рН
Конаковская ГРЭС	0,195	0,183	7,64	7,66
	0,453	0,212	8,16	8,13
Нижне-Вартовская ГРЭС	0,56	0,085	8,25	8,29
	0,59	0,070	8,32	8,32
Пермская ГРЭС	0,28	0,080	7,99	7,97
	0,27	0,090	7,99	7,95

На изложенный способ подана заявка на изобретение.

Литература

1. Пат. 2348031 Российская Федерация, МПК⁷ G01N27/27. Анализатор примесей конденсата и способ их определения / Б.М. Ларин, Е.Н. Бушуев, Е.В. Козюлина, А.Б. Ларин, С.В. Киет; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ИГЭУ им. В.И. Ленина – № 2007123881/28; заявл. 25.06.06; опубл. 27.02.09, Бюл. №6 – 3 с.

Ларин Андрей Борисович

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: yaandy_81@mail.ru

Сорокина Анастасия Ярославовна

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@xste.ispu.ru

УДК 621.321

Б.М. ЛАРИН, д.т.н., профессор; Е.А. ЩЕГОЛЕВА, магистр

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина

153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34

E-mail: admin@xste.ispu.ru

Разработка АОС «Системы обеспечения водного режима энергоблока АЭС с ВВЭР-1000»

Аннотация. Использование электронных тренажеров для обучения персонала ТЭС и АЭС является актуальной задачей в настоящее время. Данный вид обучения способствует быстрому обучению станционного персонала необходимым навыкам. Такие системы могут быть использованы не только в обучающих целях но и для проверки знаний персонала при прохождении экзаменов.

Ключевые слова: электронный тренажер, теплотехнический контроль, водно-химический режим, узлы приготовления и дозирования растворов

B.M. LARIN, Doctor of Engineering, professor,

E.A. SCHEGOLEVA, student

Ivanovo State Power Engineering University

153003, Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: admin@xste.ispu.ru*

Electronic simulator "System for ensuring the water regime of NPP with VVER- 1000"

Abstract. The use of electronic simulators for training personnel TPP and NPP is an urgent task at the moment. This type of study contributes to the rapid learning of plant personnel with necessary skills . Such systems can be used not only for training purposes but also for verification of personnel with knowledge of the examinations.

Key words: electronic simulator, heat control , water chemistry , units of preparation and dosing solutions

Энергетическая стратегия России предусматривает почти удвоенное производство электроэнергии с 2000 по 2020 г. с преимущественным ростом атомной энергетики. Для реализации данной задачи необходимы грамотные специалисты по эксплуатации основного и вспомогательного оборудования АЭС, где водно-химический режим (ВХР) является одним из важнейших факторов, влияющих на надежную

и безопасную эксплуатацию АЭС [1]. Для подготовки эксплуатационного персонала требуются новые более наглядные средства обучения.

Основным назначением разработанной автоматизированной обучающей системы (АОС) является обучение ведению водно-химического режима 1 и 2 контуров АЭС с ВВЭР-1000 студентов специальностей «Технология воды и топлива на ТЭС и АЭС» и «Атомные электростанции». Данная АОС должна использоваться обучаемыми в качестве опорного материала при самоподготовке, выполнении лабораторных работ и формировать знания по системам поддержания ВХР АЭС с ВВЭР [2].

АОС позволяет изучить процессы, происходящие с водным теплоносителем в первом и втором контурах при различных условиях работы оборудования АЭС.

В ходе работы с АОС обучаемый получает теоретические знания:

- о назначении систем обеспечения ВХР первого и второго контуров энергоблока АЭС с ВВЭР;
- расположении оборудования в общей технологической схеме и технических характеристиках систем спецводоочисток (СВО);
- параметрах теплотехнического контроля основных контуров;
- технологических операциях, связанных с эксплуатацией систем СВО первого и второго контура;
- взаимодействии персонала смены при эксплуатации систем СВО в различных режимах работы оборудования.

Разработанная АОС состоит из информационной и тестирующей частей и компьютерных лабораторных работ.

Информационная часть АОС включает в себя два компьютерных учебника по описанию систем обеспечения ВХР АЭС.

Компьютерный учебник «Водный режим первого контура энергоблока АЭС с ВВЭР-1000» включает следующие разделы: характеристика и назначение ВХР первого контура, описание основного оборудования первого контура, а также узлов дозирования реагентов и установок спецводоочисток.

В первом разделе компьютерного учебника рассматривается оборудование первого контура, в нем описываются основные процессы, происходящие в первом контуре, а также показана связь вида конструкционного материала оборудования с ВХР первого контура. Во втором разделе рассматриваются такие вопросы как: назначение ВХР первого контура, его характеристики и задачи; связь ВХР первого контура с химводоочисткой. Приведены также нормы качества теплоносителя, для того, чтобы обучаемый понимал, в каких точках тепловой схемы ведется контроль, и какие параметры контролируются. Третий раздел посвящен вопросам, касающимся приготовления и дозирования реагентов в первый контур для поддержания ВХР первого контура. В этой части рассматриваются узлы приготовления и дозирования растворов

корректирующих реагентов. В четвертом разделе рассматриваются установки спецводоочистки. Для каждой установки представлена технологическая схема, подробное описание элементов, входящих в нее, а также основные режимы ее работы.

Компьютерный учебник «Водный режим второго контура энергоблока АЭС с ВВЭР-1000» разбит на три основных части. В первой части приведена принципиальная тепловая схема второго контура АЭС и представлено описание основных узлов и оборудования. Подробно описаны принципы работы вышеперечисленных узлов и оборудования, а так же их габариты и рабочие характеристики. В компьютерном учебнике содержатся принципиальные схемы оборудования, его узлов и фотографии.

Во второй части детально рассматривается ВХР второго контура. Особое внимание было уделено характеристике и назначению ВХР второго контура; ВХР при работе энергоблока на энергетических уровнях мощности $\leq 50\%$ от номинальной ($N_{ном}$); ВХР при работе энергоблока на энергетических уровнях мощности $> 50\% N_{ном}$ и графики условий эксплуатации энергоблока при работе на энергетических уровнях мощности $\leq 50\% N_{ном}$ и $> 50\% N_{ном}$ при отклонении показателей качества продувочной воды парогенератора от нормируемых значений.

В третьей части данного компьютерного учебника рассмотрены системы обеспечения ВХР второго контура, а именно: химводоочистка, система конденсации и дегазации, установка очистки турбинного конденсата (БОУ), коррекционная обработка рабочей среды второго контура, назначение и цель коррекционной обработки рабочей среды второго контура, система продувки парогенераторов, очистка продувочной воды ПГ и химический контроль качества рабочей среды второго контура.

Для более глубокого изучения и понимания технологических процессов построение учебного материала в информационной части АОС осуществляется по принципу «от простого к сложному».

Практическая часть АОС включает компьютерные лабораторные работы, в них рассматриваются основные режимы работы установок спецводоочистки (для 1 контура – СВО-1 и СВО-2, для 2 контура – СВО-5 и БОУ). В комплекс 1 контура так же входит лабораторная работа «Водный режим и химконтроль первого контура АЭС с ВВЭР-1000». В ней представлена схема первого контура с точками отбора проб и нормируемыми показателями в этих точках. Сама программа имитирует нарушение ВХР питательной воды. Это нарушение студент определяет самостоятельно по показателям качества водного теплоносителя в контролируемой точке. Обучаемый делает вывод о причине нарушения ВХР и строит алгоритм поиска причины нарушения и его устранения. Лабораторные работы включают теоретическую, практическую и тестирующую части.

Тестирующая часть АОС предназначена для контроля степени усвоения знаний студентом. По окончании изучения теоретического материала, обучаемому предлагается тест, который содержит значительное количество вопросов двух типов – выбор одного или несколько правильных ответов из нескольких вариантов ответов. В результате прохождения теста выдается протокол тестирования, который содержит в себе количество правильных ответов, общее количество задаваемых вопросов, а также время проведения тестирования и окончательную оценку.

АОС разработан с использованием программы Adobe Flash Professional CS5 и представляет собой SWF-файлы, которые можно просматривать с помощью программы для воспроизведения flash-контента – Adobe Flash Player или аналогичных плееров swfdec, Gnash. Данный учебный комплекс может быть адаптирован под любую операционную систему, поддерживающую Flash Player.

Для восприятия изучаемого материала в АОС содержатся поясняющие цветные рисунки, схемы, таблицы, графики и видеоролики. Важным преимуществом разработанной АОС является то, что она является открытой для внесения изменений, и может дополняться разными новыми сведениями, по мере их появления.

Разработанная АОС внедряется в учебный процесс. Подано свидетельство на регистрацию программного продукта, ведется разработка методических указаний для студентов.

Литература

1. **Воронов В.Н., Ларин Б.М., Сенина В.А.** Химико-технологические режимы АЭС с ВВЭР. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. –390 с.
2. **Итоговая** конференция конкурса научных работ студентов ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Знания молодых ядерщиков – атомным станциям»: Тезисы докладов. М.: НИЯУ МИФИ, 2012. –112 с.

Ларин Борис Михайлович

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@xhte.ispu.ru

Щеголева Елена Алексеевна

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: admin@xhte.ispu.ru

СЕКЦИЯ «ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА»

УДК 621.311.22

М.Н. БАЕВА, аспирант, Р.А. ИЛЬИН, к.т.н., доцент

Астраханский государственный технический университет
414056, г. Астрахань, ул. Татищева, 16
E-mail: kaften.astu@mail.ru

Влияние присосов воздуха в газотурбинный тракт котлов и вакуумную систему паровых турбин на КПД паросиловой установки

Аннотация. Рассмотрены основные методы обнаружения присосов воздуха. По результатам анализа методов оценки присосов воздуха выявлены их достоинства и недостатки. Даны практические рекомендации по использованию каждого из рассмотренных методов.

Ключевые слова: котельные установки, паровые турбины, присосы воздуха, эффективность, методы обнаружения присосов.

M.N. BAEVA, graduate student,
R.A. ILYIN, Candidate of Engineering, docent

Astrakhan State Technical University
414056, Astrakhan, Taticeva St., 16. *E-mail: kaften.astu@mail.ru*

Influence of suction of air to the gas-turbine highway of coppers and vacuum system of steam turbines on efficiency of steam-power installation

Abstract. The main methods of detection of suction of air are considered. By results of the analysis of methods of an assessment of suction of air their merits and demerits are revealed. Practical recommendations about use of each of the considered methods are made.

Key words: boiler installations, steam turbines, air suction, effectiveness, methods of detection of prisos.

Снижение присосов наружного воздуха в газовый тракт котлов и вакуумную систему турбин остается серьезной проблемой при обеспечении эффективной работы тепломеханического оборудования. Так, увеличение присосов воздуха в топку котла (сверх нормативных) нарушает баланс между расходом воздуха поступающего в воздухоподогреватель, и количеством уходящих газов, что в свою очередь, повышает температуру уходящих газов и, как следствие, снижает КПД котла. В его конвективных газоходах, находящихся под разрежением, присосы воздуха приводят к росту затрат электроэнергии на собственные нужды котла, что снижает технико-экономические показатели электростанции.

Присосы воздуха могут быть столь значительны, что из-за недостатка тяги возникнут сложности с поддержанием и увеличением мощности котла. По правилам технической эксплуатации допустимые значения присосов наружного воздуха (или увеличение его избытка в дымовых газах) в топку и тракт котлов на участке тракта котла до выхода из пароперегревателя для газомазутных котлов производительностью менее 420 т/ч не должны превышать 5 %, для котлов большей производительности – 3 % и для пылеугольных котлов – 8 и 5 % соответственно. На участке котла от водяного экономайзера до выхода из дымооса присосы воздуха должны быть не более 10 % при трубчатом воздухоподогревателе и не более 25 % – при регенеративном. Топки и газоходы с цельносварными экранами должны быть бесприсосными [1].

Острой проблемой являются присосы воздуха в вакуумную систему турбоагрегата – это одна из основных причин увеличения давления отработавшего пара в конденсаторе, что снижает мощность и экономичность работы энергоблока. Примесь воздуха значительно ухудшает теплотехнические характеристики конденсатора, так как коэффициент теплоотдачи при конденсации пара составляет несколько тысяч кВт/(м²·°C), а для паровоздушной смеси с большим содержанием воздуха — всего несколько десятков кВт/(м²·°C). Снижение фактического вакуума от нормативного на 3 % дает увеличение удельного расхода топлива на 3-4 г/кВтч, в год перерасход топлива составляет 16,116 млн. руб (для тепловой электростанции мощностью 380 МВт). Повышение давления в конденсаторе на 1 кПа (0,01 атм) для турбин с начальным давлением пара 13-24 МПа снижает мощность и КПД установки на 0,8-0,9 %. В связи с этим к плотности вакуумной системы турбин предъявляются особенно жесткие требования: правила технической эксплуатации допускают значение присосов воздуха в вакуумную систему турбин не выше 15-30 кг/ч при электрической мощности энергоблока 100-300 МВт.

Присосы в котел оценивают исходя из прироста коэффициента избытка воздуха, для чего одновременно измеряют и анализируют состав дымовых газов в топке и конвективных газоходах. Однако результаты такого анализа, не смотря на его трудоемкость, не дают возможности определить конкретные места присосов. Часто их находят по отклонению факела на работающем котле или с помощью анемометра; при этом котел ставится под разряжение или избыточное давление.

В вакуумных системах турбин основные места присосов воздуха – это неплотности арматуры, ее сальниковые и фланцевые соединения, конденсатные насосы, конденсаторы, концевые уплотнения цилиндров турбины, линии отборов проб и измерительных приборов. Однако и здесь возможности выявления мест присосов ограничены. Обычно эти места определяются осмотром на остановленной турбине методом гидравлической опрессовки парового пространства или методом парового наддува. Вследствие большой разветвленности вакуумных систем

выявление воздушных неплотностей методом опрессовки весьма трудоемко и требует значительного времени. К тому же он недостаточно чувствителен и может применяться лишь при холодном состоянии турбоустановки, что существенно снижает коэффициент эффективного использования теплотехнического оборудования и, как следствие, экономические показатели станции.

Основные методы обнаружения присосов воздуха в вакуумную систему:

1. Галоидный течеискатель.
2. Ультразвуковой течеискатель
3. Метод инфракрасной термографии с помощью современной тепловизионной техники.

Метод инфракрасной термографии считается оптимальным и наиболее достоверным и, достаточно несложным в осуществлении. В основу методики положено максимальное исключение влияния субъективного фактора на выводы по результатам проведенного исследования. Объективность достигается применением верифицированного компьютерного программного обеспечения с набором функций, позволяющих анализировать термограммы, определять минимальную, максимальную и среднюю температуру в областях различной формы, строить графики, изотермы, гистограммы областей исследуемого объекта с небольшой разницей температур, которая возникает из-за присоса относительно холодного наружного воздуха через неплотность (сквозное отверстие, трещину, щель), где температура материала снижается относительно остальных участков. Это снижение температуры бывает небольшим, но высокая чувствительность применяемой тепловизионной техники (до 0,08 °С) позволяет его зафиксировать [2, 3].

На рис. 1 и 2, для примера, показаны фотографии тепловизионной съемки газохода котла, на которых видны места с более низкой температурой исследуемых поверхностей.

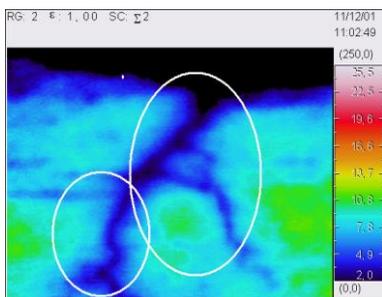


Рис. 1. Газоход

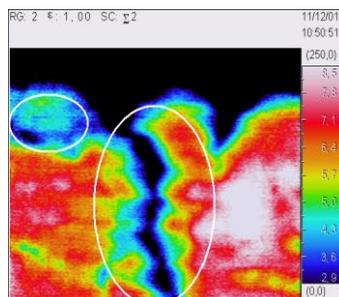


Рис. 2. Газоход

Данный метод является многофакторным мероприятием, требует планового выполнения измерений на контролируемом объекте и снятия термограмм с установленной периодичностью. Сравнительный анализ термограмм, включающих в себя исходный «тепловой портрет», позволяет выявить динамику развития внутреннего дефекта и, как следствие, предсказать вероятность его перехода в открытое состояние [2].

Часто этот метод применяют для диагностики электрооборудования.

Обеспечение высокой плотности вакуумных систем турбоустановок является одним из важнейших мероприятий по энергосбережению и повышению надежности на тепловых электростанциях.

Литература

1. **Правила** технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. – М.: ОРГРЭС, 2003.
2. **Авдеев А.А.**, Жингель В.И., Меркушов А.П., Кожевников Л.В. Метод обнаружения присосов воздуха в котлах и турбинах с помощью тепловизора // Теплоэнергетика. – 2007. – №2. – С. 26-30.
3. **РД 153-34.0-20.364-00.** Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования. – М.: ОРГРЭС, 2000.

УДК 621.577.42

С.А. БАННИКОВА, ассистент,
В.М. ЗАХАРОВ, к.т.н., профессор

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

Особенности математического моделирования работы устройства для утилизации потерь в канале теплотрассы

Аннотация. Приводятся обстоятельства и результаты математического моделирования термодинамической системы, состоящей из устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы и сети теплоснабжения с различным взаимным расположением и конфигурацией ее основных элементов.

Ключевые слова: утилизация тепловых потерь, теплотрасса, грунтовый коллектор, тепловой насос.

S.A. BANNIKOVA, assistant;
V.M. ZAKHAROV, Candidate of engineering, professor,

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

Features of Mathematical Modelling of Using The Device for Heat Loss Utilization from Thermal Network of Heating System

Abstract. The author describes circumstances and results of mathematical modelling of the thermodynamic system consisting of the device for heat loss utilization from thermal network of heating system and the network with a various relative positioning and a configuration of its basic elements

Key words: heat loss utilization, thermal network, ground collector, heat pump.

В статье приводятся обстоятельства и результаты математического моделирования термодинамической системы, состоящей из устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы и сети теплоснабжения с различным взаимным расположением и конфигурацией ее основных элементов. Такое устройство представляет собой винтовой спиральный коллектор, воспринимающий линейные тепловые потери от трубопроводов тепловой сети системы теплоснабжения и, сопряженный с ним, пароконденсационный трансформатор теплоты [1, 2].

Базовым является условие работы устройства, при котором отбор теплоты от сети осуществляется таким образом, чтобы с одной стороны, не превышать допустимые значения теплового потока [3], а с другой стороны обеспечить отбор тепловой энергии, необходимый для эффективной работы теплового насоса.

Целью работы является моделирование процесса переноса тепловой энергии от сетевой воды к теплоносителю в коллекторе устройства по утилизации потерь теплотрассы для различных конструкций коллектора в программной среде COMSOL Multiphysics 4.3b.

Опыт автора по построению математической модели в программе Elcut 5.1 Professional [7] показал ограниченность применения данного программного продукта, вызванного сложностью корректного описания процессов теплообмена на поверхности теплопровода в двумерном пространстве. Исходя из возможностей программного комплекса COMSOL Multiphysics 4.3b и наличия его лицензионной версии в вузе, принято искать дальнейшее решение с помощью этой программы.

К настоящему времени в работе решены следующие задачи, определяющие достижение заявленной цели:

1. Описаны и учтены все физические характеристики материалов элементов теплотрассы и устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, необходимых для моделирования процесса.

2. Составлены основные уравнения, описывающие процесс переноса тепловой энергии в элементах теплотрассы.

3. Составлена математическая модель процесса переноса тепловой энергии в элементах теплотрассы

4. Определен метода решения.

5. Проведены численных расчетов.

Решением первой задачи явилось получение исчерпывающего представления о структуре, свойствах элементов и характере их взаимодействия в рамках рассматриваемой термодинамической системы. Описаны и учтены все физические характеристики материалов элементов теплопровода и устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, необходимых для моделирования процесса.

Вторая задача и ее решение связано с составлением основных уравнений, описывающие процесс переноса тепловой энергии в элементах теплотрассы.

Базовыми уравнениями в модуле теплопередачи для сопряженного теплообмена и неизотермического течения являются уравнения неразрывности, течения вязкой жидкости и распространения тепла в жидкости и твердом теле.

В третьей задаче определены начальные, граничные условия и приняты допущения для различных теплотехнических конфигураций рассматриваемых термодинамических систем.

В четвертой задаче для численного анализа процессов теплообмена был выбран метод конечных элементов, позволяющий рассчитывать несколько физических задач в рамках одной модели. Данный метод лежит в основе программных продуктов COMSOL и MATLAB.

В пятой задаче выполнены численные расчеты для следующих термодинамических систем:

- Горизонтального грунтового коллектора змеевикового типа, расположенного в песчаной и глинистой почве в диапазоне плотностей $1,5 \dots 2,0 \text{ т/м}^3$ с теплофизическими свойствами, соответствующими сухому, влажному и водонасыщенному состоянию;

- Непроходного канала теплотрассы с теплопроводом с температурой теплоносителя $90 \text{ }^\circ\text{C}$, с изоляцией из пенополиуретана толщиной 20 мм в диапазоне скоростей воздуха вдоль поверхности теплопровода от 0 до 0,1 м/с без учета лучистого теплообмена.

- Непроходного канала теплотрассы с теплопроводом, вокруг которого размещен один виток коллектора с фиксированным тепловосприятием. В качестве примера формы подачи результатов расчета на рисунке 1 показано распределение температур в продольном сечении канала теплотрассы с кольцом тепловосприятия (один виток спирального коллектора).

- Спирального грунтового коллектора размещенного в песчаной и глинистой почве в диапазоне плотностей $1,5 \dots 2,0 \text{ т/м}^3$ с теплофизическими свойствами, соответствующими сухому, влажному и водонасы-

ценному состоянию с внутренним источником тепловой энергии которым является канал теплотрассы.

Исследования процессов переноса тепловой энергии от теплоносителя в трубопроводе сети теплоснабжения с канальной прокладкой [3, 4] в окружающую среду определяют конвективную составляющую в процессе теплопередачи как доминирующую, что справедливо лишь отчасти.

Работы по исследованию оптимальных условий применения теплоотражающих экранов в различных термодинамических системах [5, 6] говорят о доминанте лучистой составляющей в процессе теплопереноса, которую предстоит учесть на следующем этапе работы.

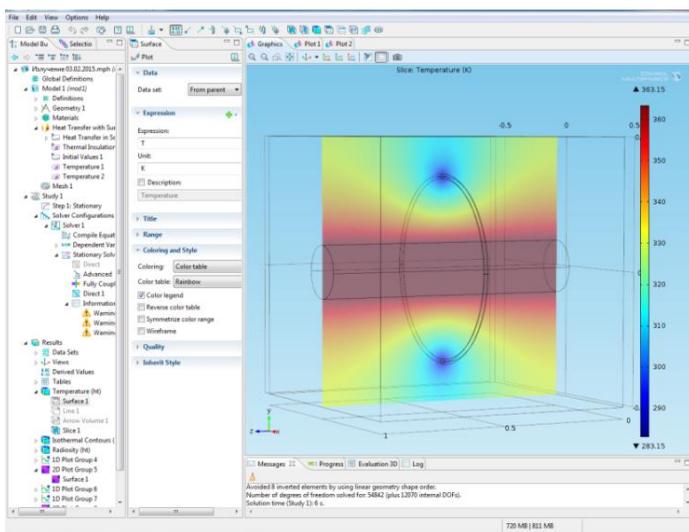


Рис. 1. Температурное поле в продольном сечении канала теплотрассы с кольцом тепловосприятия (один виток спирального коллектора)

В работах [2,6] было указано на возможность размещения в канале теплотрассы теплоотражающих экранов для исключения нежелательного влияния работы коллектора на процесс транспортировки теплоносителя в сети, что дополнительно потребует включить в математическую модель описание работы теплоотражающего экрана.

Кроме этого за отчетный период была подана заявка на полезную модель «Трансформатор теплоты сезонного действия», которая позволяет расширить диапазон применения результатов научного исследования автора.

Литература

1. **Захаров В.М., Банникова С.А.** Устройство для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Патент на полезную модель № 103175, 2011 г.
2. **Захаров В.М., Банников А.В., Банникова С.А., Лапатеев Д.А.** Устройство для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Патент на полезную модель № 103175, 2011 г.
3. **СНИП 41-03-2003.** Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов / Госстрой России. – М.:ГУП ЦПП, 2003. – 22 с.
4. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов. – 7-е изд., стереот. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 472 с.: ил.
5. **Захаров В.М., Смирнов, Калинина Л.Б.** Энергосберегающие конструкции окон на основе применения теплоотражающих экранов. // Светопрозрачные конструкции, 2008, №5-6, С. 42-45.
6. **Лапатеев Д.А., Смирнов Н.Н.** Снижение тепловых потерь через окна и в каналах теплотрассы за счёт применения металлических экранов // Наука и инновации в технических университетах: материалы Шестого Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб: СПбГПУ, 2012. – С.124 – 126.
7. **Банникова С.А., Захаров В.М.** Математическое моделирование процессов переноса тепловой энергии в системе «коллектор – тепловая сеть» // Инновационные проекты молодых ученых 2012 г.: сб.отчетов/Иван.гос.энерг.ун-т.т.1.-Иваново, 2013.

Банникова Светлана Андреевна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: sabannikova@rambler.ru
Захаров Вадим Михайлович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: sabannikova@rambler.ru

УДК 536.2

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор;
А.К. ГАСЬКОВ, аспирант

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

Использование энергосберегающей краски для уменьшения потерь тепловой энергии при транспорте теплоносителя

Аннотация. Показана эффективность использования энергосберегающей краски в качестве тепловой изоляции на трубопроводах тепловых пунктов, эксплуатирующихся в условиях повышенной влажности.

Ключевые слова: энергосберегающая краска, тепловая изоляция

V.V. BUKHMIROV Doctor of Engineering, professor
A.K. GASKOV postgraduate student
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

The application of energy-saving paint to reduce heat losses in the transport of coolant

Abstract. The efficiency of the energy-saving paint using as heat insulation heating supply stations pipelines exploited in conditions of high humidity has been shown.

Key words: energy-saving paint, thermal insulation

Уменьшение потерь тепловой энергии при транспорте теплоносителя, в качестве которого, как правило, используют горячую воду, является актуальной задачей повышения энергетической эффективности систем теплоснабжения. Для снижения тепловых потерь используют различные виды тепловой изоляции на минеральной и органической основе. Материал, из которого изготовлена тепловая изоляция трубопроводов горячей воды должен обладать следующим основным качествами: низкой теплопроводностью, малым водопоглощением, низкой коррозионная активностью, высоким электрическим сопротивлением, механической прочностью. При этом, в зависимости от способа и места прокладки трубопроводов, к тепловой изоляции предъявляются разные требования: для трубопроводов котельных и ТЭС – это низкая теплопроводность и высокая температуростойкость, а для трубопроводов подземной прокладки – во-первых, низкое влагопоглощение и, во-вторых, низкая теплопроводность. Эффективные теплоизоляционные материалы с высокой пористостью, легко впитывающие влагу из окружающей среды, не пригодны для трубопроводов подземной прокладки. Так, например, коэффициент теплопроводности минеральной ваты при объёмной влажности 20% в 3 раза выше, чем у сухой ваты с влажностью не более 0,5% [1].

Тепловую изоляцию при подземной прокладке трубопроводов гидроизолируют специальными мастиками. Гидроизоляцией покрывают и наружную поверхность труб для исключения коррозии металла при возможном повреждении изоляционного покрытия.

В настоящее время на рынке теплоизоляционных материалов появился новый теплоизоляционный материал - тонкоплёночные теплоизоляционные покрытия (энергосберегающие краски), содержащие в своём составе микросферы. Энергосберегающая краска - это эмульсия, состоящая из связующего компонента и микроскопических керамических или стеклянных пустотелых сфер диаметром $0,03 \pm 0,1$ мм. Энергосберегающие краски обладают свойствами красок – защищают поверхность от воздействия окружающей среды, и свойствами тепловой изоляции – снижают тепловые потери за счёт своей пористой структуры. К

достоинствами энергосберегающих красок относят:

- дешевизну компонентов, из которых её изготавливают;
- низкую стоимость покрасочных работ;
- высокую адгезию к любым материалам, кроме полиэтилена;
- механическую прочность;
- антигрибковые и противоплесневые свойства;
- влаго- и паронепроницаемость покрытия;
- устойчивость к ультрафиолетовому излучению;
- хорошую колеруемость пигментами.

Для исследования эффективности применения энергосберегающих красок была проведена серия экспериментов по измерению температур и тепловых потоков на трубопроводах горячей воды, расположенных в тепловом пункте под проезжей частью дороги на пересечении ул. Калинина и ул. Фурманова г. Иваново.

Тепловой пункт предназначен для размещения запорной арматуры трубопроводов отопления и горячего водоснабжения. В тепловом пункте проходят два трубопровода прямой и обратной сетевой воды диаметром 219 мм и длиной 2300 мм. Тепловой пункт регулярно затапливается водой, проникающей через люки с проезжей части дороги, и через каналы трубопроводов при авариях на магистралях. Из-за высокой обводнённости грунта теплового пункта обслуживающий персонал, выполняющий оперативные переключения в системе теплоснабжения, использует трубопроводы в качестве трапов для прохода к запорной арматуре и, как следствие, к механическим повреждениям теплоизоляционной и её гидроизоляционной слоёв. Поэтому тепловая изоляция намокает, а повышенная влажность приводит к коррозии металла трубопроводов. Высокая влажность и механические нагрузки от действий обслуживающего персонала приводят к утрате теплоизоляционных свойств пористой изоляции и поэтому её применение становится нецелесообразным.

Для снижения коррозии металла и уменьшения тепловых потерь теплоносителя было предложено покрыть трубопроводы в тепловом пункте энергосберегающей краской. Перед покраской трубопроводы были очищены от пыли и грязи при помощи металлической щётки. Покраска трубопроводов проводилась малярной кистью в два этапа: 1) нанесение грунтовочного слоя; 2) нанесение основного слоя энергосберегающей краски. Средняя толщина слоя краски, измеренная штангенциркулем, составила $\delta_{кр} = 2,5 \pm 0,2$ мм.

Эффективность применения энергосберегающей краски была определена сравнением температуры наружной стенки трубопроводов и тепловых потоков с их поверхности «до» и «после» покраски. Эксперименты выполнены при помощи измерителя плотности тепловых потоков и температуры ИТП-МГ4.03/Х(1) «Поток» с относительной погрешностью измерения плотности теплового потока $\pm 6\%$ и абсолютной погрешностью измерения температуры $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Датчики измерения темпе-

ратур и тепловых потоков были установлены на предварительно очищенную от ржавчины поверхность трубопроводов при помощи медного провода и клейкой ленты. Измерения температур и тепловых потоков выполнены в два этапа: 1) на неокрашенных трубопроводах; 2) через три недели после покраски. Между измерениями тепловой пункт и покрашенные трубопроводы были затоплены горячей водой из-за аварии на теплотрассе. Затопление трубопроводов не привело к разрушению слоя энергосберегающей краски, что характеризует стойкость данного вида покрытий к действию влаги.

В табл. 1 приведены результаты эксперимента. Анализ результатов измерений установил, что при использовании тонкоплёночных покрытий происходит уменьшение тепловых потерь и снижение температур поверхности окрашенных трубопроводов. Нанесение тонкоплёночного покрытия: 1) уменьшило тепловые потери от прямого трубопровода на 42,5%, а от обратного трубопровода на 63,4%; 2) уменьшило температуру поверхности прямого трубопровода на 17°С, обратного трубопровода на 23,1°С.

Таблица 1. Результаты измерений "до" и "после" нанесения на трубопроводы энергосберегающей краски

Параметр		Ед. изм.	До	После
Температура поверхности трубопровода	Прямой	°С	57,2	40,2
	Обратный		53,9	30,8
Плотность теплового потока с поверхности трубопровода	Прямой	Вт/м ²	817,8	470,6
	Обратный		629,6	230,3
Температура воды в трубопроводе (диспетчерские данные)	Прямой	°С	70	74
	Обратный		61	47

По температуре и значению теплового потока рассчитано термическое сопротивление теплопередаче "до" и "после" нанесения энергосберегающего покрытия. По величине термического сопротивления теплопроводности, создаваемого энергосберегающей краской и измеренной толщине её слоя был рассчитан коэффициент теплопроводности энергосберегающей краски. Среднее по расчётам значение коэффициента теплопроводности энергосберегающей краски составило 0,0442 Вт/м·К. Экспериментально найденный коэффициент теплопроводности энергосберегающей краски приблизительно равен коэффициенту теплопроводности сухой минеральной ваты ($\lambda=0,05$ Вт/м·К), поэтому толщины энергосберегающей краски и минераловатной изоляции должны быть одного порядка, что экономически невыгодно. Однако, в условиях повышенной влажности теплоизоляционные свойства минераловатных утеплителей резко уменьшаются и использование энергосберегающей краски становится экономически целесообразным энергосберегающим мероприятием.

Вывод. Энергосберегающую краску целесообразно использовать в качестве тепловой изоляции трубопроводов в тепловых пунктах, эксплуатирующихся в условиях повышенной влажности. При этом тонкопленочное покрытие одновременно выполняет и функцию гидроизоляции.

Литература

1. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов.- 7-е изд., стереот.- М.: Издательство МЭИ, 2001.- 472 с.: ил.

Бухмиров Вячеслав Викторович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: *buhmirov@tot.ispu.ru*
Гаськов Александр Константинович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: *kafedra@tot.ispu.ru*

УДК 628.87

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор;
М.В. ПРОРОКОВА, аспирант

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

Способ оценки эффективности работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования жилых, общественных и административных зданий

Аннотация. Разработан новый способ оценки эффективности работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования с точки зрения обеспечения комфортных для человека параметров микроклимата, который может быть использован при оценке целесообразности внедрения энергосберегающих мероприятий.

Ключевые слова: энергосбережение, система энергоснабжения, уровень комфортности микроклимата.

V.V. BUKHMIROV, Doctor of Engineering, professor,
M.V. PROROKOVA, Graduate student
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: *solm@drive.ispu.ru, sma24sma@yandex.ru*

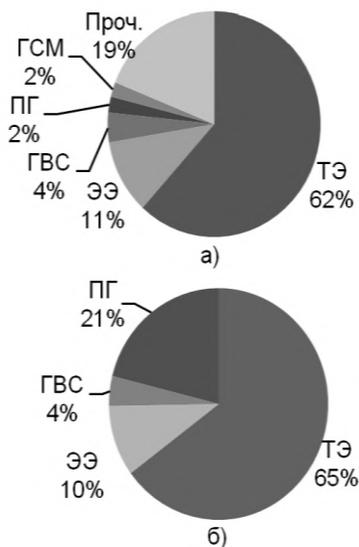
Method of the estimation of effectiveness of the work of the heating systems, ventilation and conditioning of the habitable, public and office buildings

Abstract. Is developed the new method of the estimation of effectiveness of the work of the heating systems, ventilation and conditioning, that considers the pa-

rameters of microclimate comfortable for the man. This method can be used during the estimation of the expediency of introducing the energy-saving measures.

Key words: energy-saving, power supply system, the level of the comfort of the microclimate

В зданиях жилого и административного назначения основными потребителями топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) являются системы, формирующие микроклимат в помещениях: система отопления, система вентиляции и система кондиционирования (рис. 1.). По этой причине в зданиях указанного типа, наиболее часто реализуют энергосберегающие мероприятия, направленные на сокращение потребления тепловой энергии [1]. Однако опыт внедрения энергосберегающих мероприятий показывает, что часто внедрение технических решений, направленных на сокращение потребления ТЭР в одной из систем энергоснабжения зданий, приводит к снижению эффективности работы остальных систем [2]. Например, замена деревянных окон на ПВХ-стеклопакеты, имеющие большее термическое сопротивление теплопередачи и меньшую воздухопроницаемость, способна снизить потери теплоты помещением, в том числе за счет инфильтрации, но при этом может быть снижена эффективность работы системы естественной вентиляции. Таким образом, оценка эффективности работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования (систем ОВК) должна стать обязательным этапом при обосновании целесообразности внедрения энергосберегающих мероприятий.



Поскольку основной задачей систем ОВК является создание условий, комфортных для человека с точки зрения микроклимата, в качестве параметра, характеризующего эффективность их работы выбран интегральный показатель, учитывающий тепловлажностный режим помещения, а также качество воздушной среды. В основу разработки нового способа оценки эффективности работы систем ОВК положены исследования С. Олесена, П.О. Фангера, А. Мачкаши, В.А. Максимовича, О.С. Кочетова и др.

Рис. 1. Структура энергопотребления: а – общественные и административные здания; б – жилые здания; ГСМ – горюче-смазочные материалы; ПГ – природный газ; ГВС – горячее водоснабжение; ЭЭ – электроэнергия; ТЭ – тепловая энергия для отопления

Специалистами Ивановского энергетического университета имени В.И. Ленина предложено давать оценку эффективности работы систем ОВК по «уровню комфортности микроклимата (W)» – показателю, объединяющему численную характеристику теплового состояния человека в помещении и поправки, снижающие комфортность микроклимата при наличии источников радиационного охлаждения, асимметрии радиационного излучения и качестве воздуха, ниже значений, установленных в ГОСТ 30494—2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» [3]. Изменяется уровень комфортности микроклимата пределах от ± 1 (абсолютно комфортное состояние) до 0 (полное отсутствие комфорта).

Численному значению уровня комфортности микроклимата соответствует качественная характеристика «степень комфортности», выражающая субъективное ощущение комфорта (дискомфорта) «среднестатистическим» человеком.

Способ оценки эффективности работы систем ОВК реализован в виде программы в среде MathCad. Программа позволяет не только вычислять уровень и определять степени комфортности микроклимата, но и рассчитывать требуемые параметры среды в помещении, которые могут быть использованы для настройки эффективной работы систем ОВК.

На рис. 2 и рис. 3 приведены диаграммы для подбора параметров микроклимата в целях обеспечения требуемого уровня комфортности, построенные для условий: помещение – учебная лаборатория ВУЗа, температура воздуха – $20\text{ }^{\circ}\text{C}$; подвижность воздуха – $0,01\text{ м/с}$; относительная влажность воздуха – 50% ; средняя температура ограждающих поверхностей – $19,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для этих условий уровень комфортности помещения составил

$W = -0,809$, а степень комфортности микроклимата – «прохладно, но комфортно».

Кривые $W = \pm 1$ показывают, какие параметры микроклимата должны быть обеспечены в помещении для комфортного теплового состояния человека.

Если системы регулирования параметров микроклимата не способны поддерживать комфортный уровень микроклимата, рис. 2 и рис. 3. позволяют найти сочетание темпера-

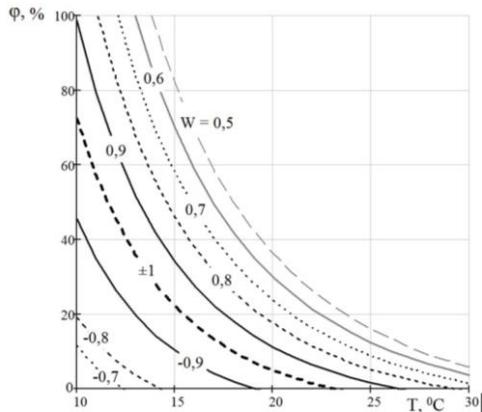


Рис.2. Зависимость относительной влажности воздуха от его температуры для разных значений уровня комфортности

туры, относительной влажности и подвижности воздуха в помещении, обеспечивающее уровень комфортности, наиболее близкий к $W = \pm 1$.

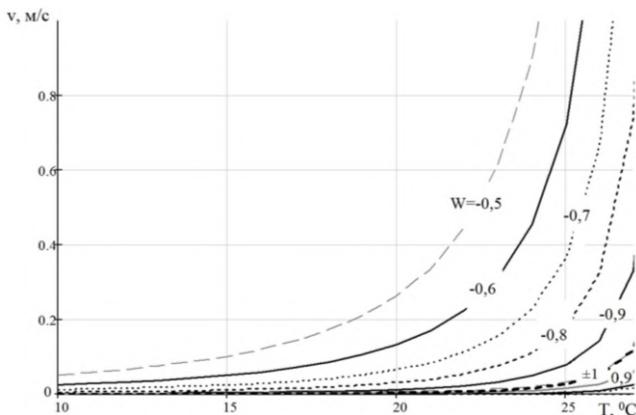


Рис.3. Зависимость подвижности воздуха от его температуры для разных значений уровня комфортности

Ограничением использования диаграмм, приведенных на рис. 2 и рис. 3, являются нормы, установленные ГОСТ 30494–2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях» [3]. Например, для помещений 2-й категории [3], в которых в которых люди заняты умственным трудом, учебой, температура воздуха в холодный период года должна лежать в интервале 19 – 21 °C (оптимальные условия) или 18 – 23 °C (допустимые условия), а относительная влажность должна иметь значения 30 – 45% (оптимальные условия) или быть не более 60% (допустимые значения).

Вывод. Разработан новый способ оценки эффективности работы систем отопления, вентиляции и кондиционирования, который может быть использован при анализе целесообразности внедрения энергосберегающих мероприятий для зданий непроизводственного назначения.

Литература

1. Бухмиров В.В., Махов О.Н., Пророкова М.В. Результаты энергоаудита зданий и сооружений бюджетных учреждений // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Состояния и перспективы развития электротехнологий» (XVII Бенардосовские чтения). Иваново: ФГБОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина», 2013. Т. 2. С. 222– 225.
2. Комплексный анализ эффективности энергосберегающих мероприятий / М.В. Пророкова, В.В. Бухмиров // Материалы отчетной конференции молодых ученых ИГЭУ «Энергия инноваций – 2012». – Иваново: ИГЭУ, 2013 – Т.1. – С. 44 – 48
3. ГОСТ 30494—2011 «Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях»

Бухмиров Вячеслав Викторович,
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
е-mail: buhmirov@tot.ispu.ru
Пророкова Мария Владимировна,
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
е-mail: prorokova_mv@list.ru

УДК 621.6.035

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор;
Г.А. РОДИОНОВ, к.т.н.;
М.В. ПРОРОКОВА, аспирант

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

Пути повышения энергетической эффективности систем пневмотранспорта

Аннотация. Проведен анализ различных путей повышения энергетической эффективности систем пневмотранспорта. Сделан вывод о том, что для повышения энергетической эффективности пневмотранспортных систем, при внедрении новых энергосберегающих технологий, целесообразно применять методы математического моделирования, с целью выбора лучших решений.

Ключевые слова: энергетическая эффективность, системы пневмотранспорта, математическое моделирование.

V.V. BUKHMIROV, Doctor of Engineering, professor
G.A. RODIONOV, PhD ;
M.V. PROROKOVA, a graduate student.
Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya 34. E-mail: kaftot@yandex.ru

Improving energy efficiency pneumatic conveying systems

Abstract. Pneumatic conveying systems have the highest energy consumption in transportation of bulk materials. We have analyzed the different ways to improve the energy efficiency of pneumatic systems. Conclusion: to improve the energy efficiency of pneumatic conveying systems, the introduction of new energy-saving technologies is advisable to investigate with the help of mathematical modeling.

Keywords: energy efficiency, pneumatic conveying system, mathematical modeling.

Экономия и повышение эффективности использования энергетических ресурсов входят в число восьми приоритетных направлений развития науки, технологий и техники Российской Федерации, утвер-

жденных Указом Президента РФ от 7 июля 2011 г. N 899 "Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации". Основными потребителями ТЭР являются промышленные предприятия. Реализация технологического процесса во многих отраслях промышленности требует перемещения больших объемов сыпучих материалов. При этом на долю пневмотранспорта приходится около 30% объема всех работ по транспортировке сыпучих материалов. Системы пневмотранспорта имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными средствами транспортировки сыпучих материалов: компактность, возможность полной автоматизации, высокие гигиенические показатели, способность одновременно с транспортированием материала изменять его состояние (сушка, увлажнение и т.д.), простота обслуживания. Однако, системы пневмотранспорта обладают самыми высокими затратами энергии на тонну перемещаемого материала. В некоторых случаях данный показатель превышает энергетические затраты традиционных видов транспорта в 10-15 раз.

Существует несколько путей повышения энергетической эффективности систем пневмотранспорта (рис.1).

Каждый из указанных способов повышения эффективности пневмотранспортных систем имеет свои достоинства и недостатки. Придание частицам начальной скорости продольного направления, предложенное В.И. Беспаловым [1], представляет достаточно перспективное направление. Но более тщательное изучение данного вопроса показывает, что движение любой частицы за счет столкновения друг с другом и стенками материалопровода происходит по сложной случайной траектории. Изначально преданная частице продольная скорость за счет такого характера движения снижается до нуля.

Метод снижения энергоемкости за счет псевдооживления слоя материала может быть использован только в системах транспортировки мелкодисперсных материалов (цемент, известь, песок, опилки и т.п.).

Способ снижения энергоемкости за счет перекрытия не используемых в данный момент ответвлений пневмотранспортной сети [2] применяется в сложных пневмотранспортных системах и может использоваться одновременно с другими способами повышения энергоэффективности ПТУ.

Наиболее универсальным путем снижения энергоемкости систем пневмотранспорта можно назвать повышение качества монтажа рабочей арматуры. Различие диаметров участков труб, возникающее вследствие допусков при их изготовлении, образование затеков металла при сварном соединении труб, неудовлетворительное качество центровки материалопроводов и воздухопроводов, образование местных загрязнений может привести к значительным потерям давления в системе пневмотранспорта и, как следствие, дополнительной нагрузке на компрессорные установки.

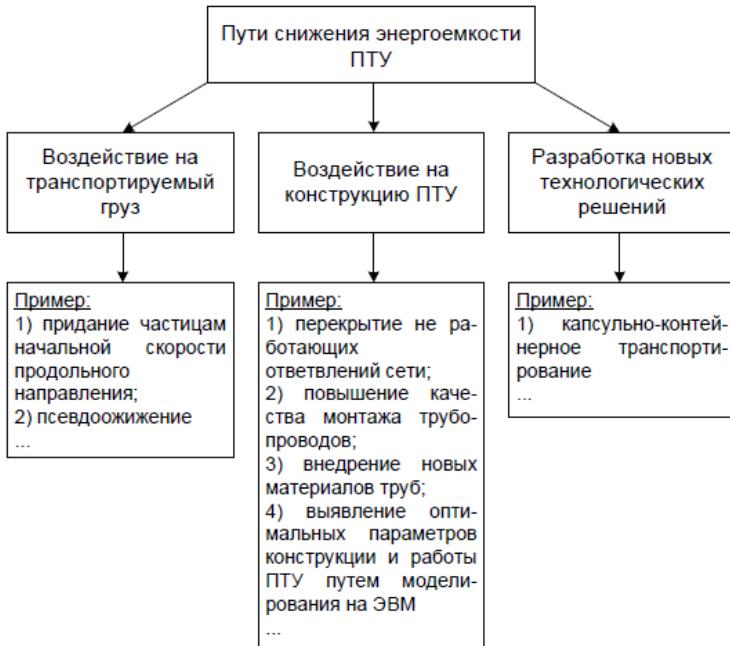


Рис.1. Пути повышения энергетической эффективности систем пневмотранспорта

В настоящее время для производства труб и вспомогательного оборудования пневмотранспортных систем используют новые материалы: полимеры, композитные материалы и т.п. Применение современных материалов способствует снижению местных гидравлических потерь и потерь давления по длине трубопроводов, а также, в некоторых случаях, позволяет упростить технологию монтажа и повысить качество работ по сооружению пневмотранспортных систем.

Благодаря появлению и совершенствованию программно вычислительных комплексов, появилась возможность выявления наиболее экономичных режимов работы систем пневмотранспорта.

Математическое моделирование процессов гидродинамики двухфазных потоков в системах пневмотранспорта имеет ряд существенных преимуществ:

- возможность разработки модели конкретной системы пневмотранспорта для заданного материала;
- возможность отказа от дорогостоящих промышленных экспериментов при оценке энергосберегающих решений;

– возможность анализа как стационарных, так и переходных режимов работы пневмоустановок, включая аварийные.

Вывод. В настоящее время оптимальные режимные и конструктивные параметры пневмотранспортных установок целесообразно находить путем исследования современных энергосберегающих технологий при помощи компьютерного моделирования.

Литература

1. **Беспалов, В.И.** Исследование пневмотранспорта щепы на разгонных участках трубопровода / В.И. Беспалов // Дисс. к.т.н. - М.: Химки, 1976. - 152с.
2. **Ларионов, В.А.** Пневмотранспорт измельченной древесины с переменным расходом воздуха / В.А. Ларионов. - М.: Лесная промышленность, 1977. - 119 с.

УДК 620

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор,
Т.Е. СОЗИНОВА, к.т.н., доцент

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

Обучение специалистов, ответственных за энергосбережение и повышение энергетической эффективности

Аннотация. На базе учебно-методического центра ИГЭУ «Энергосбережение» в 2014 году было организовано обучение в рамках реализации государственной программы «Энергоэффективность и энергетика». Повышение квалификации прошли 182 специалиста, которые являются ответственными за энергосбережение и повышение энергетической эффективности в своих организациях.

Ключевые слова: энергосбережение, энергетическая эффективность, повышение квалификации.

V.V. BUKHMIROV, Doctor of Engineering, professor,
T.E. SOZINOVA, Candidate of Engineering, docent,

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: kafedra@tot.ispu.ru*

Education professionals responsible for energy saving and energy efficiency

Abstract. On the basis of the Training Center ISPU "Energy Saving" in 2014, training was organized within the framework of the state program "Energy Efficiency and Energy". Further training took place 182 professionals who are responsible for energy conservation and energy efficiency in their organizations.

Key words: energy conservation, energy efficiency, training.

Энергосбережение и энергоэффективность являются одним из приоритетных направлений развития экономики Российской Федерации.

Постановлением Правительства РФ № 321 от 15 апреля 2014 года утверждена государственная программа «Энергоэффективность и энергетика» [1], которая включает в себя семь подпрограмм:

1. Энергосбережение и повышение энергетической эффективности;
2. Развитие и модернизация электроэнергетики;
3. Развитие нефтяной отрасли;
4. Развитие газовой отрасли;
5. Реструктуризация и развитие угольной промышленности;
6. Развитие использования возобновляемых источников энергии;
7. Обеспечение реализации государственной программы.

Для реализации государственной политики в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности нужны квалифицированные специалисты. Поэтому в подпрограмме «Энергосбережение и повышение энергетической эффективности» отдельным мероприятием выделено повышение квалификации специалистов, ответственных за энергосбережение и повышение энергетической эффективности [1]. Согласно Госпрограмме с 2014 по 2020 год обучение должны пройти не менее 200 тысяч специалистов в области энергосбережения и повышения энергоэффективности.

В рамках реализации политики Правительства РФ Министерством энергетики Российской Федерации разработана стратегия подготовки специалистов, ответственных за энергосбережение и повышение энергетической эффективности в организациях и учреждениях бюджетной сферы. Минэнерго России ежегодно организует обучение лиц, ответственных за энергосбережение и повышение энергетической эффективности в бюджетной сфере. В 2014 году в соответствии с государственной программой [1] планировалось повышение квалификации 15 тысяч специалистов во всех регионах России.

В Ивановском государственном энергетическом университете имени В.И. Ленина (ИГЭУ) в 2009 году создан учебно-методический центр «Энергосбережение» для подготовки энергоаудиторов, энергоменеджеров и ответственных за энергосбережение на предприятиях и в учреждениях, в котором прошли обучение по системе дополнительного образования более 1300 специалистов [2, 3, 4, 5].

Именно ИГЭУ готов был принять участие в реализации данного этапа выполнения государственной программы по Ивановской области и в 2014 году провёл обучение представителей федеральных органов исполнительной власти, органов исполнительной власти Ивановской области, органов местного самоуправления, а также представителей организаций и учреждений бюджетной сферы Ивановской области, ответственных за энергосбережение и повышение энергетической эффективности.

Согласно договору между федеральным государственным бюджетным учреждением «Российское энергетическое агентство» (РЭА) Министерства энергетики Российской Федерации и ИГЭУ на оказание образовательных услуг по повышению квалификации на базе учебно-методического центра ИГЭУ «Энергосбережение» состоялось обучение по программе «Практические вопросы реализации государственной политики в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности» в объеме 144 академических часа в период с 02 июня по 20 сентября 2014 года.

Для определения уровня подготовки и квалификации Слушателей в первый день обучения было проведено входное тестирование. При формировании списков групп и графика обучения учитывались результаты входного тестирования, квалификация и должностные обязанности Слушателей в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности. В результате было сформировано 6 групп по 28-30 человек в каждой. За каждой группой Слушателей был закреплён преподаватель-консультант, для выполнения обязательных практических проектных работ и куратор для решения организационных вопросов в период обучения.

Обучение Слушателей было построено по модульному принципу. При выполнении первого модуля занятия проводились в форме лекций в объеме 24 академических часа по основным положениям государственной программы в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности.

Второй модуль (96 академических часа) включал в себя практические занятия. В течении трёх дней Слушатели под руководством преподавателя проходили практику по:

- составлению энергетической декларации для своей организации;
- проведению пропаганды энергосбережения и повышения энергетической эффективности применительно к организации или учреждения в сфере деятельности Слушателя;
- составлению или корректировке программы энергосбережения организации (учреждения), представителем которой является Слушатель;
- оценке экономической эффективности мероприятий, планируемых к реализации в рамках капитального ремонта зданий (сооружений).

В дальнейшем Слушатели самостоятельно выполняли проектные работы, тематическая направленность которых соответствует основным направлениям государственной программы Российской Федерации [1]. Эти работы Слушатели выполнили в заочном режиме обучения без отрыва от производства.

Для оказания помощи Слушателям при выполнении проектных работ был организован постоянно действующий Центр консультационной и методической поддержки при УМЦ «Энергосбережение». График работы Центра консультационной и методической поддержки был размещён на официальном сайте ИГЭУ. Слушатели имели возможность

получить консультацию по вопросам нормативно-правового обеспечения, энергетического обследования и энергетического менеджмента, составления региональных программ, по техническим вопросам установки узлов учёта, освещения, теплоснабжения и т.п. Консультации по всем вопросам были оказаны и руководителям организаций и учреждений, в которых работают Слушатели.

Третий модуль (24 академических часа) включал в себя семинары, круглые столы и защиту проектов, разработанных Слушателями ранее.

За качеством обучения в Ивановском государственном энергетическом университете осуществлялся нерерывный контроль со стороны Министерства энергетики. Во-первых, ИГЭУ обеспечил прямую видеотрансляцию процесса обучения со всех образовательных площадок. Во-вторых, ИГЭУ осуществил видеозапись всего процесса обучения. Все видеозаписи были переданы в Российское энергетическое агентство (РЭА). В-третьих, был осуществлен контроль за оказанием образовательных услуг по повышению квалификации в июне 2014 года экспертами из Рособнадзора. В-четвертых, Слушатели по окончании обучения заполнили анкеты с оценкой качества работы преподавателей и сотрудников ИГЭУ о ходе повышения квалификации (о качестве преподавания и о качестве организации учебного процесса). Эти анкеты также были переданы в РЭА.

В УМЦ «Энергосбережение» Ивановского государственного энергетического университета имени В.И.Ленина в 2014 году прошли повышение квалификации 182 специалиста, которые являются ответственными за энергосбережение и повышение энергетической эффективности в своих организациях.

Литература

1. **Постановление** Правительства РФ от 15 апреля 2014 года № 321 «Об утверждении госпрограммы «Энергоэффективность и развитие энергетики».
2. **Бухмиров В.В., Костерин А.Ю., Созинова Т.Е.** Организация образовательного процесса в ИГЭУ в сфере энергосбережения и повышения энергетической эффективности // Материалы научно-практической конференции ENERGY-2012. – Санкт-Петербург. – 2012. – Т.2. – с. 93-95.
3. **Бухмиров В.В., Созинова Т.Е.** Основы энергосбережения и повышения энергоэффективности для отраслей ЖКХ // Сборник материалов I Международной научно-практической конференции «Научное обеспечение жилищно-коммунального хозяйства». – Астана, Казахстан. – 2012. – с. 38-39.
4. **Бухмиров В.В., Созинова Т.Е., Костерин А.Ю.** Профессиональная подготовка энергоменеджеров в УМЦ ИГЭУ «Энергосбережение» // Состояние и перспективы развития электротехнологии. Международная научно-техническая конференция (XVII Бенардосовские чтения). Материалы конференции. – Иваново. – 2013. – Т.4 – с.48-50.
5. **Бухмиров В.В., Созинова Т.Е.** Разработка квалификационных требований к подготовке энергоаудиторов в рамках профессионального дополнительного образования. // Современная система образования: опыт прошлого и перспективы будущего: монография. – Одесса, Украина.– 2014. – с. 134-153.

Бухмиров Вячеслав Викторович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru
Созинова Татьяна Евгеньевна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: ste@ispu.ru

УДК 62-67

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор;
Ю.С. СОЛНЫШКОВА, к.т.н., доцент;
В.А. ТИБАЙКИН, гл. инженер; Г.Н. ЩЕРБАКОВА, ст. преподаватель;
А.Ю. КОСТЕРИН, доцент; Г.А. РОДИОНОВ, к.т.н., ассистент

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

**Разработка программы энергосбережения
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный
энергетический университет имени В.И. Ленина» (ИГЭУ)
на 2015 – 2017 гг. и программы
энергосбережения котельной ИГЭУ на 2014–2018 гг.**

Аннотация. Даны общие сведения о мероприятиях по энергосбережению и повышению энергетической эффективности, реализованных в ИГЭУ к 2015 году. Показаны основные мероприятия по программе энергосбережения ИГЭУ на 2015 – 2017 годы и котельной ИГЭУ на 2014 – 2018 годы с оценкой экономической эффективности мероприятий.

Ключевые слова: энергосбережение, энергоэффективность, программа, экономия топливно-энергетических ресурсов.

V.V. BUKHMIROV Doctor of Engineering, professor,
Y.S. SOLNYSHKOVA Candidate of Engineering, docent,
V.A. TIBAYKIN, chief engineer
G.N. SCHERBAKOVA, senior Teacher
A.Y. KOSTERIN, docent, G.A. RODIONOV, assistant

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

**Development of energy-saving program for ISPU for 2015–2017
years and for boiler house of ISPU for 2014 – 2018 years**

Abstract. There are given general information on energy efficiency measures and energy efficiency, which have been implemented for the 2015 year. Shown the main activities of the program of energy saving for ISPU for 2015 – 2017 years and for boiler house of ISPU for 2014 – 2018 years.

Key words: energy saving, energy efficiency, program, saving fuel and energy resources.

После принятия Федерального закона №261 от 23 ноября 2009 года «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [1] повышение энергетической эффективности и энергосбережение, в том числе в бюджетных организациях, вновь стало актуальной задачей. Согласно ФЗ №261 [1] «каждая организация с участием государства...должна разработать энергетический паспорт потребителя топливно-энергетических ресурсов» (ТЭР). Энергетический паспорт разрабатывается на основе комплексного обследования (энергоаудита) систем потребления ТЭР объекта. Основными результатами обследования являются перечень выявленных проблем и предложения (энергосберегающие мероприятия (ЭСМ)) по повышению энергетической эффективности систем потребления ТЭР. При этом энергетический паспорт содержит перечень предлагаемых ЭСМ с обязательной оценкой экономической эффективности их внедрения. Срок действия паспорта составляет 5 лет. В ИГЭУ паспорт разработан в 2012 году. В результате обследования были предложены энергосберегающие мероприятия по видам ТЭР и воде, которые вошли в энергетический паспорт ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». К 2015 году в ИГЭУ реализованы мероприятия по капитальному ремонту теплотрассы котельной ИГЭУ, замене старых окон на пластиковые стеклопакеты, замене трубопроводов внутренней разводки системы отопления в общежитии №3, установке приборов учета в зданиях ИГЭУ и другие мероприятия, рекомендованные по результатам энергетического обследования. Подготовлен проект системы вентиляции цокольного этажа корпуса Б ИГЭУ. В настоящее время завершаются работы по установке вентилируемого фасада корпуса В ИГЭУ.

В конце 2009 года в Российской Федерации принято Постановление Правительства №1225 от 31 декабря 2009 года «О требованиях к региональным и муниципальным программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности» [2]. Программа энергосбережения – это план внедрения ЭСМ в организации. В программе энергосбережения приводят перечень ЭСМ с укрупненным расчетом технико-экономических показателей и оценкой объемов потребления ТЭР после внедрения ЭСМ. В российском законодательстве [2, 3, 6, 8] нет строгих требований о периоде действия программ энергосбережения. Программа может быть разработана на 1-2 года или на 5 лет. ИГЭУ является бюджетным учреждением, и, поскольку, бюджет организации формируется на 3 года, то программа энергосбережения ИГЭУ разработана на период с 2015 по 2017 годы. Программа энергосбережения ИГЭУ выполнена в соответствии с нормативными документами [2–8], содержит сведения об основных целевых показателях и перечень мероприятий программы.

Все энергосберегающие мероприятия согласованы и утверждены Ректоратом ИГЭУ. В табл. 1 приведен перечень энергосберегающих мероприятий (выборочно), включенных в программу энергосбережения ВУЗа, которая содержит 8 мероприятий.

По укрупненным оценкам за период реализации программы планируется:

- снизить расходы на энергетические ресурсы не менее чем на 9 % по отношению к 2014 г. с ежегодным снижением расходов на 3 %;
- снизить удельные показатели потребления энергетических ресурсов не менее чем на 9% по отношению к 2014 г.;
- сэкономить в стоимостном выражении 9901,292 тыс. рублей (в ценах 2014 года).

Таблица 1. Перечень основных типовых энергосберегающих мероприятий, включенных в программу энергосбережения ИГЭУ

№ п/п	Наименование мероприятия программы	2015 - 2017 годы				
		Финансовое обеспечение реализации мероприятия		Экономия топливно-энергетических ресурсов		
		источник	объем, тыс. руб.	В натуральном выражении		В стоимостном выражении, тыс. руб.
				Кол-во	Ед. измерения	
1	2	3	4	5	6	7
1	Установка двух котлоагрегатов на нужды ГВС в летний период	Бюджет/внебюджет	4000	275,61 6	тыс.м ³	1481,1
2	Замена системы отопления общежития №3а	Бюджет/внебюджет	3000	65,2 5	тыс.м ³	447,366
3	Пропаганда энергосбережения за счет внедрения системы энергоменеджмента	Бюджет/внебюджет	300	171,9 (вода) 74,46 (эл.эн.)	м ³ тыс. кВт·ч	300,486
4	Проведение энергетического обследования	Бюджет/внебюджет	1500	142,66	т у.т.	3931,1

При этом суммарная экономия топлива, тепловой и электрической энергии в сопоставимых условиях составит 661,724 т у.т., а экономия воды в сопоставимых условиях – 0,172 тыс. куб. м.

Специалистами ИГЭУ отдельным документом разработана программа энергосбережения котельной ИГЭУ на 2014 – 2018 годы. Требования к программам энергосбережения организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности в Ивановской области, установлены

постановлением РСТ Ивановской области № 287 от 19 июля 2010 года [8]. Основные мероприятия, вошедшие в программу энергосбережения котельной, приведены в табл. 2.

Таблица 2. **Перечень основных типовых энергосберегающих мероприятий, включенных в программу энергосбережения котельной ИГЭУ**

№ п/п	Наименование мероприятия программы	2014 - 2018 годы				
		Финансовое обеспечение реализации мероприятия		Экономия топливно-энергетических ресурсов		
		источник	объем, тыс. руб.	В натуральном выражении		В стоимостном выражении, тыс. руб.
Кол-во	Ед. измерения					
1	Установка двух котлоагрегатов на нужды ГВС в летний период	Бюджет/внебюджет	4000	275,616	тыс.м ³	1481,1
2	Проведение режимной наладки котельных агрегатов	Бюджет/внебюджет	100	176,47	тыс.м ³	559,226

Реализация программы энергосбережения котельной ИГЭУ позволит снизить потребление ТЭР более чем на 12,35% за 5 лет при среднем сроке окупаемости проектов 0,751 года. Программа энергосбережения котельной ИГЭУ принята в РСТ Ивановской области в январе 2014 года.

Литература

1. **Федеральный закон** РФ от 23 ноября 2009 года № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. **Постановление** Правительства РФ от 31 декабря 2009 года №1225 «О требованиях к региональным и муниципальным программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности».
3. **Приказ** Минэкономразвития РФ от 17 февраля 2010 года №61 «Об утверждении примерного перечня мероприятий в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности, который может быть использован в целях разработки региональных, муниципальных программ в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности».
4. **Федеральный закон** РФ от 25.02.1999 г. №40-ФЗ «Об инвестиционной деятельности в РФ, осуществляемой в форме капитальных вложений».
5. **Методические** рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов.
6. **Приказ** Минэнерго России от 30.06.2014 №398 «Об утверждении требований к форме программ в области энергосбережения и повышения энергетической

эффективности организаций с участием государства и муниципального образования, организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности, и отчетности о ходе их реализации».

7. **Прогноз** социально-экономического развития Российской Федерации на 2015 год и на плановый период 2016 - 2017 годов.

8. **Постановление** РСТ Ивановской области №287 от 19 июля 2010 года «Об установлении требований к программам в области энергосбережения и повышения энергетической эффективности организаций, осуществляющих регулируемые виды деятельности».

Бухмиров Вячеслав Викторович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru

Солнышкова Юлия Сергеевна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: yusoln@mail.ru

Тибайкин Вячеслав Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: tibaikin@ispu.ru

Щербакова Галина Наумовна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru

Костерин Александр Юрьевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: buhmirov@tot.ispu.ru

Родионов Геннадий Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

e-mail: gendolff@mail.ru

УДК 621.311

С.В. ВАСИЛЬЕВ, к.т.н., доцент

А.В. БАННИКОВ, к.т.н., доцент

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина

153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

E-mail: vasilyev.pte@mail.ru

Повышение эффективности работы котельных с водогрейными котлами

Аннотация. Рассматриваются вопросы использования низкопотенциальных источников тепловой энергии с помощью энергетических установок малой мощности, работающих по органическому циклу Ренкина. Приведена оригинальная тепловая схема водогрейной котельной с когенерацией.

Ключевые слова: низкопотенциальная тепловая энергия, энергоустановка малой мощности, органический цикл Ренкина, рабочее тело.

S.V. VASILIEV, Candidate of engineering, docent;
A.V. BANNIKOV, Candidate of engineering, docent,

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

Increase of efficiency of boiler-houses with water-heating boilers

Abstract. The authors consider the use of low-grade heat sources by power plants, which operate on the basis of Organic Rankine Cycle. In the article the original thermal scheme of a water-heating boiler with cogeneration is resulted.

Key words: low-grade heat, low power plants, Organic Rankine Cycle, work fluid.

Анализ долгосрочного опыта эксплуатации котельных с водогрейными котлами указывает на целый ряд недостатков их работы. Кроме этого опыт последних лет эксплуатации российских систем теплоснабжения в зимних условиях показывает, что нередки случаи нарушения электроснабжения источников тепла. При этом прекращение подачи электроэнергии в котельные может привести к серьезным последствиям как в самой котельной (остановка вентиляторов, дымоходов, выход из строя автоматики и защиты), так и вне ее (замерзание теплотрасс, систем отопления зданий и т.п.). Так как в современных условиях, характеризующихся крайним дефицитом средств на капитальное строительство, устранение недостатков и повышение эффективности работы котельных должно происходить путем их модернизации.

Одним из направлений повышения энергетической эффективности водогрейных котлов является снижения потерь теплоты с уходящими газами. В водогрейных котельных утилизация теплоты может производиться в теплообменных аппаратах контактного или поверхностного типов, устанавливаемых в газоходах котлов [1-3]. Существуют многочисленные конструкции теплоутилизаторов все их можно разделить на конденсационные и «сухого» типа. Подогреватели «сухого» типа менее выгодны с точки зрения теплообмена, однако применение интенсифицированных поверхностей нагрева позволяет существенно повысить их эффективность.

Недостатком водогрейной котельной при ее использовании в качестве основного источника теплоснабжения является жесткая зависимость ее работы от внешних источников электроснабжения.

Наиболее распространенными техническими решениями выработки электрической энергии в водогрейных котельных являются размещение в них газопоршневых или газотурбинных установок. Другим решением этой проблемы является организация собственного производства электрической энергии в водогрейной котельной на базе осуществления цикла Ренкина, используя в качестве рабочего тела низкокипящее вещество, которое в дальнейшем будем называть «агент» [4]. Тепловая схема, позволяющая реализовать данную технологию [5] включает в себя водогрейный котел с системой трубопроводов, сете-

вым и рециркуляционным насосом, систему подготовки подпиточной воды, в которую входят подогреватель сырой воды, химводоочистка, подогреватель химочищенной воды, вакуумный деаэратор и подпиточный насос, а также контур с низкокипящим рабочим агентом, состоящий из турбины с электрогенератором, теплообменника-испарителя, конденсатора и питательного насоса.

Недостатком такой схемы является снижение экономичности водогрейной котельной вследствие отбора большого количества высокотемпературной сетевой воды после котла в контур низкокипящего рабочего агента (контур обеспечения независимого электроснабжения).

В данной статье предлагается другое техническое решение, позволяющее повысить энергетическую эффективность котельной за счет утилизации теплоты уходящих газов [6]. На рис. 1 показана принципиальная схема присоединения теплоутилизатора и низкокипящего контура к водогрейной котельной.

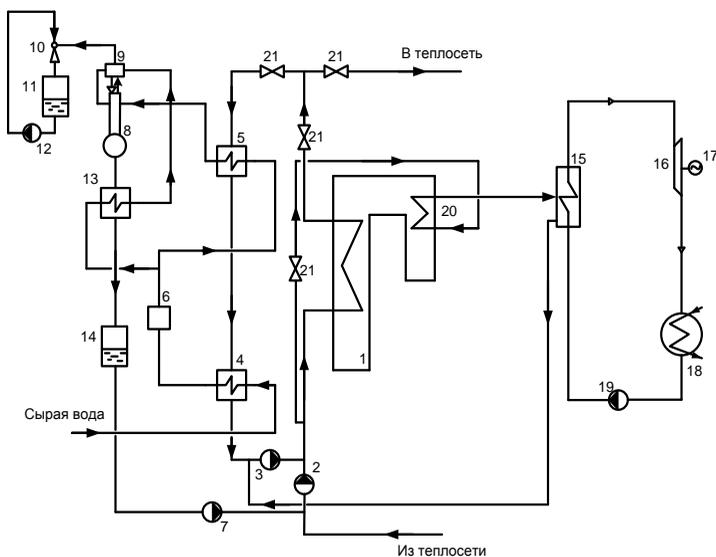


Рис. 1. Принципиальная схема присоединения теплоутилизатора и низкокипящего контура к водогрейной котельной:

- 1 – водогрейный котел; 2 – сетевой насос; 3 – рециркуляционный насос;
- 4 – подогреватель сырой воды; 5 – подогреватель химочищенной воды;
- 6 – фильтры химочистки; 7 – подпиточный насос; 8 – вакуумный деаэратор;
- 9 – охладитель выпара; 10 – водоструйный эжектор; 11 – бак эжектора;
- 12 – насос подачи воды к эжектору; 13 – теплообменник – испаритель;
- 14 – турбина; 15 – электрогенератор; 16 – конденсатор;
- 17 – питательный насос; 18 – поверхностный теплообменник уходящих газов

Результат применения такого решения достигается тем, что тепловая схема водогрейной котельной, включающая водогрейный котел, соединенный с подающим и обратным трубопроводами сетевой воды системы теплоснабжения, сетевой и рециркуляционный насос, систему подготовки подпиточной воды, содержащую подогреватель сырой воды, химводоочистку, подогреватель химочищенной воды, вакуумный деаэратор и подпиточный насос, контур низкокипящего рабочего агента, включающий турбину с электрогенератором, теплообменник-испаритель, конденсатор и питательный насос, причем вход турбины соединен с выходом теплообменника-испарителя, а выход турбины – с входом конденсатора, выход которого соединен с входом теплообменника-испарителя через питательный насос, вход теплообменника-испарителя соединен с выходом поверхностного теплообменного аппарата, дополнительно встроенного в газоход котла, а выход – с входом этого теплообменного аппарата через рециркуляционный насос и систему трубопроводов.

Благодаря подогреву обратной сетевой воды в поверхностном теплообменном аппарате, дополнительно встроенному в газоход котла, обеспечивается требуемая температура воды для нагрева низкокипящего рабочего агента в контуре обеспечения независимого электрообеспечения. Это так же позволяет полезно использовать теплоту уходящих газов, исключая использование высокотемпературной сетевой воды в качестве греющего агента, тем самым повысив экономическую эффективность водогрейной котельной.

Для практической реализации предлагаемой схемы необходимо решить ряд вопросов: подобрать низкокипящее вещество (рабочий агент); выбрать турбину, работающую по органическому циклу Ренкина; определить оптимальные режимы работы теплосилового устройства, теплообменного оборудования и теплоутилизатора; определить величину максимальной электрической мощности, которую можно получить из условий рассматриваемой котельной, с учетом графика потребления электрической энергии.

При решении задачи выбора рабочего тела, следует учитывать различные факторы, такие как: экологическая безопасность технологии, теплофизические свойства рабочего тела (теплопроводность и теплоемкость, вязкость, критические параметры), термохимические характеристики, стоимость НРТ, его доступность и изученность.

Примером низкокипящего рабочего тела для реализации цикла может служить хладон R-134a, который имеет подходящие термодинамические свойства. Кроме этого он химически неактивен и безопасен, характеризуется нулевым озоноразрушающим потенциалом ($ODP = 0$) и невысоким потенциалом парникового эффекта ($GWP = 1300$), нетоксичен и взрывобезопасен. По сути, хладон 134a является рабочим агентом для областей применения, в которых особое значение придается безопасности и постоянству эксплуатационных характеристик [4,5].

Для решения задачи выбора основного и вспомогательного оборудования на стадии принятия проектных решений, авторы хотели бы привести пример ряда фирм, присутствующих на современном теплоэнергетическом рынке, которые занимаются исследованием и серийным выпуском установок работающих по ORC (ORC – органический цикл Ренкина): «Turboden srl» (Италия), «ADORATEC GmbH» (ФРГ), «GMK GmbH», ООО «ССС-ЭНЕРГО» (УКРАИНА), «INFINITY TURBINE», «Ormat Technologies Inc» и «Capstone Turbine Corporation» (США), ООО «Комтек-Энергосервис» (Россия).

Литература

1. **Аронов И.З.** Контактный нагрев воды продуктами сгорания природного газа.- Л.Недра.1990.-.280с.
2. **Кудинов А.А., Антонов В.А., Алексеев Ю.М.** Энергоснабжение в газифицированных установках путем глубокого охлаждения продуктов сгорания // Теплоэнергетика .2000. №1.с.59-61.
3. **Шарапов В.И., Орлов М.Е.** Технологии обеспечения пиковой нагрузки систем теплоснабжения.-М. Новости теплоснабжения.2006 .
4. **Гринман М.И., Фомин В.А.** Перспективы применения энергетических установок с низкотемпературными рабочими телами // Новости теплоснабжения. 2010. №7.
5. **Репин Л.А., Тарасов Д.Н., Макеева А.В.** Возможности производства электроэнергии в водогрейных котельных//Новости теплоснабжения. 2008, №9.
6. Пат. №145822 (RU). Тепловая схема водогрейной котельной /С.В. Васильев, А.А.Гуськова, А.В. Банников // Б. И. 2014 №24.

Васильев Сергей Владимирович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: vasilyev.pte@mail.ru

Банников Александр Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: avbannikov@rambler.ru

УДК 621.311

В.М. ЗАХАРОВ, к.т.н., профессор;
Н.Н. СМИРНОВ, доцент; Д.А. ЛАПАТЕЕВ, инженер

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

Тройной энергетический эффект для систем энергоснабжения зданий от использования теплоотражающих экранов с солнечными панелями в окнах

Аннотация. Разработана методика по определению минимальной температуры воздуха внутри помещения при дежурном режиме отопления в случае использования в окнах теплоотражающих экранов. Разработан многофункциональный энергоэффективный ставень с солнечной батареей.

Ключевые слова: окна с теплоотражающими экранами, дежурный режим отопления, солнечные батареи, образование конденсата на окнах.

V.M. ZAKHAROV Candidate of engineering, professor,
N.N. SMIRNOV docent,
D.A. LAPATEEV engineer

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

Triple power effect in power supply systems of buildings due to energy-efficient windows with heat-reflective shields and solar cells

Abstract . The method to determine the minimum indoor air temperature under standby heating using heat-reflective shields in the windows was developed. Multifunctional energy-efficient shutter with solar battery has been developed.

Keywords: windows with heat-reflective shields, setback heating mode, solar cells, condensation on windows.

В сертифицированной климатической камере АНО «Ивановостройиспытания» были проведены исследования [1] по изучению влияния применения теплоотражающих экранов в окнах на повышение сопротивления теплопередаче окон и снижения тепловых потерь.

Как показали расчёты и опытные данные (табл. 1) при применении в окнах теплоотражающих экранов, установленных снаружи, увеличивается сопротивление теплопередачи до $1,76 \text{ м}^{2,0}\text{С/Вт}$ и значительно повышается температура на внутреннем стекле, следовательно мы можем дополнительно понизить температуру воздуха внутри помещения (в зависимости от влажности внутри помещения) во время отсутствия людей.

Таблица 1. Данные испытания теплоотражающих экранов в окнах с низкоэмиссионным покрытием

Вариант	Тепловой поток q , Вт/м ²	Температура на внутреннем стекле t_w , °С	Приведенное сопротивление теплопередаче R , м ^{2,0} С/Вт	R/R _{кон} троль1	R/R _{кон} троль2
Контроль 1 4М1х10х4М1х10х4М1	76,1	12,5	0,47	-	-
Контроль 2 4М1х10х4М1х10х4И (с покрытием)	58,9	14,15	0,61	1,29	-
2 экрана с холодной стороны	20,77	18,65	1,757	3,74	2,89

Нам было интересно выяснить каким образом можно определить значение температуры до которой система автоматизации сможет

понизить температуру воздуха t_{\circ}^{BH} при дежурном режиме отопления при условии недопущения выпадения конденсата на внутренней поверхности стекла окна с повышенными теплозащитными свойствами (с применением теплоотражающих экранов).

После проведения математических преобразований было определено, что вышеуказанную температуру t_{\circ}^{BH} можно вычислить следующим образом:

$$t_{\circ}^{BH} = \frac{\tau_p \cdot \alpha_{BH} \cdot R_{\text{окна}} - t_H}{\alpha_{BH} \cdot R_{\text{окна}} - 1} + \Delta t_{\text{зап}}, \quad (1)$$

где τ_p - температура точки росы при параметрах воздуха в рабочее время, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta t_{\text{зап}}$ - температурный запас по недопущению конденсации (принимаем в 1°C);

$R_{\text{окна}}$ - приведенное сопротивление теплопередаче светопрозрачной зоны окна, $\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$;

α_{BH} - коэффициент теплоотдачи от внутреннего воздуха к стеклу, принимаем $8,7 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$;

t_H - температура наружного воздуха, $^{\circ}\text{C}$.

Температуру точки росы воздуха, находящегося в помещении в рабочее время, можно определить по формуле Магнуса-Тетенса [2] с погрешностью $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ (в диапазоне температур от 5 до 25°C , и в диапазоне относительных влажностей от 10 до 70%):

$$\tau_p = \frac{b \cdot \gamma(t_p^{BH}, \phi_p^{BH})}{a - \gamma(t_p^{BH}, \phi_p^{BH})}, \quad (2)$$

где $a = 17,27$; $b = 237,7$;

$$\gamma(t_p^{BH}, \phi_p^{BH}) = \frac{a \cdot t_p^{BH}}{b + t_p^{BH}} + \ln\left(\frac{\phi_p^{BH}}{100}\right). \quad (3)$$

Согласно полученным формулам в вычислительных средах Mathcad и Excel нами была составлена программа по вычислению минимальной температуры воздуха при дежурном режиме отопления и использовании окон с теплоотражающими экранам.

Моделировалось изменение приведенного сопротивления светопрозрачной части окна R от $0,5$ до полученных в результате эксперимента $1,757 \text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C} / \text{Вт}$, температура наружного воздуха t_H задавалась от минус 10 до минус 30°C , температура воздуха в рабочее время фиксировалась на уровне 20°C . Расчёт был произведён для относитель-

ной влажности ϕ , равной 35 и 50 %. Результаты расчётов можно увидеть на рис. 1.

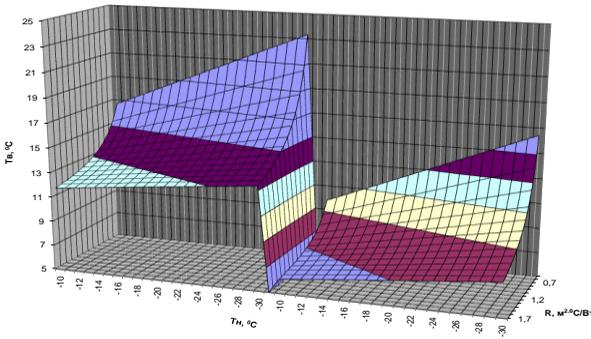


Рис. 2. Зависимость изменения минимально-допустимой температуры воздуха T_b при дежурном режиме отопления от R и t_n . Левая половина графика - при $\phi=50$ %, правая – при $\phi=35$ %

Авторами также была разработана и запатентована конструкция панели из теплоотражающих экранов с применением с наружной стороны солнечной батареи. Использование солнечной батареи позволяет вырабатывать электрическую энергию, обеспечивающую не только автономную работу окна с теплоотражающими экранами, но и частично (или полностью) покрывающую электрическую нагрузку потребителя, а также, при больших объёмах генерации, подаваемую во внешнюю электрическую сеть, причём КПД преобразования солнечного света в электроэнергию достигает 20 %.

Получаем, что при применении окон с теплоотражающими экранами и солнечной батареей наблюдается тройной энергетический эффект: в отопительный период уменьшаются теплопотери за счёт увеличения сопротивления окна, снижаются затраты теплоты на нагрев помещения за счёт понижения температуры воздуха внутри помещения при дежурном режиме отопления, а также происходит выработка электрической энергии. Эффективность использования вышеуказанных панелей была рассчитана для условий нескольких городов России и Франции.

Литература

1. **Бомон С.**, Хольтсвейлер Э., Захаров В.М., Смирнов Н.Н., Яблоков А.А., Лапатеев Д.А. Разработка и испытание автоматизированных окон с теплоотражающими экранами, отвечающих Российским и Европейским требованиям в области энергосбережения // Вестник ИГЭУ. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2013 г.. – №5. – С. 13-24.

2. **Barenburg, A.W.T.** Psychrometry and Psychrometric Charts, 3rd Edition, Cape Town, S.A.: Cape and Transvaal Printers Ltd., 1974.

Захаров Вадим Михайлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: colia@rambler.ru

Смирнов Николай Николаевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: colia@rambler.ru

Лапатеев Денис Александрович

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: I.denis7789@yandex.ru

УДК 621.1

В.А. ИППОЛИТОВ, к.т.н., доцент,
О.В. БЕЛЯЕВА,

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования "Национальный исследовательский
университет "МЭИ"

111250 г. Москва, ул. Красноказарменная, д. 14

E-mail: ippolitovVA@mpei.ru

Использование энтальпии образования углеродосодержащих веществ для расчета процесса газификации твердых бытовых отходов

Аннотация. По итогам расчёта материального и теплового баланса газификации ТБО были получены состав генераторного газа и адиабатическая температура процесса газификации. Апробация предложенной математической модели проводилась путём сравнения расчётов с данными, полученными в [2].

Ключевые слова: твёрдые бытовые отходы, газификация, уравнение сохранения энергии в полных энтальпиях.

I. V. IPPOLITOV,
O. V. BELYAEVA

Federal state budgetary educational institution of
of higher professional education "national research University "MPEI"
Moscow, Russian Federation. *E-mail: ippolitovVA@mpei.ru*

Using the enthalpy of formation of carbonaceous matter to calculate the gasification process of municipal solid waste

Abstract. After the calculation of material and heat balance in gasification of MSW were obtained from the composition of the producer gas and the adiabatic temperature of the gasification process. The proposed mathematical model was performed by comparing the calculations with the data obtained in [2].

Key words: municipal solid waste, gas, equation of conservation of energy in full enthalpies.

В России ежегодно образуется около 300 кг твердых бытовых отходов (ТБО) на одного человека, которые требуют переработки, либо захоронения. Их химический состав включает от 20 до 45 % - неорганических веществ, от 55 до 80% - органических, в том числе от 28 до 35 % углерода. В настоящее время создание энергетически эффективных и экологически чистых технологий переработки (утилизации) твердых бытовых отходов (ТБО) является актуальной задачей. Одним из перспективных термохимических способов утилизации является процесс газификации.

В данной работе был проведён расчёт материального и теплового баланса процесса газификации ТБО характерного по составу для средней полосы России и получен равновесный состав генераторного газа, а также адиабатическая температура процесса газификации. Были записаны уравнения материального баланса по углероду, кислороду, водороду и азоту, а также уравнения закона действующих масс для реакций водяного газа и паровой конверсии метана. Выход и состав генераторного газа зависит от температуры, поэтому вышеперечисленные уравнения необходимо дополнить законом сохранения энергии в полных энтальпиях, который имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 H_{ТБО} + H_{ок} = & ((\Delta H_{CH_4}^0 + H_{CH_4}^{T_{22}}) \cdot V_{CH_4} + (\Delta H_{CO}^0 + H_{CO}^{T_{22}}) \cdot V_{CO} + \\
 & + (\Delta H_{CO_2}^0 + H_{CO_2}^{T_{22}}) \cdot V_{CO_2} + (\Delta H_{N_2}^0 + H_{N_2}^{T_{22}}) \cdot V_{N_2} + \\
 & (\Delta H_{H_2}^0 + H_{H_2}^{T_{22}}) \cdot V_{H_2} + (\Delta H_{H_2O}^0 + H_{H_2O}^{T_{22}}) \cdot V_{H_2O}) \cdot \frac{1000}{22,4}
 \end{aligned} \quad (1)$$

$H_{ТБО}$, кДж/кг – полная энтальпия ТБО, $H_{ок}$, кДж/кг – полная энтальпия окислителя; $H_{CH_4}^{T_{22}}$, $H_{CO}^{T_{22}}$, $H_{CO_2}^{T_{22}}$, $H_{N_2}^{T_{22}}$, $H_{H_2}^{T_{22}}$, $H_{H_2O}^{T_{22}}$, кДж/моль – энтальпии нагрева моля продуктов газификации от $T=298$ К до равновесной температуры процесса (T_{π}) ($H_0^T - H_{298}^0$); $\Delta H_{CH_4}^0$, ΔH_{CO}^0 , $\Delta H_{CO_2}^0$, $\Delta H_{N_2}^0$, $\Delta H_{H_2}^0$, $\Delta H_{H_2O}^0$ кДж/моль – энтальпии образования моля продуктов газификации при $T=298$ К (ΔH_{298}^0); $\cdot V_{CH_4}$, $\cdot V_{CO}$, $\cdot V_{CO_2}$, $\cdot V_{N_2}$, $\cdot V_{H_2}$, $\cdot V_{H_2O}$, V_{sum} , м³/кг – удельные выходы продуктов газификации и их суммарный выход.

Для этого необходимо определить энтальпию образования исходного вещества – ТБО. Горючие компоненты отходов имеют широкие пределы изменения плотности, их химический состав близок, так как они являются производными целлюлозы ($C_6H_{12}O_6$). В данной работе использовалась следующая обобщённая формула для определения состава ТБО: $C_m H_n O_l N_k S_s + Zol$, где m – количество молей углерода на кг ТБО; n – количество молей водорода на кг ТБО; l – количество

молей кислорода на кг ТБО; k - количество молей азота на кг ТБО; s - количество молей серы на кг ТБО; $Zol = \frac{A^p}{100} \cdot 1000$ – зольный остаток.

Уравнение окисления отхода:

$$C_m H_n O_l N_k S_s + Zol + (s + m + \frac{n}{4}) \cdot O_2 =$$

$$= m \cdot CO_2 + \frac{n}{2} \cdot H_2O + s \cdot SO_2 + Zol \quad (2)$$

Для золы также можно определить энтальпию образования. Обобщенная формула для золы:

$$Si m_{-} si Al m_{-} al Fe m_{-} fe Ca m_{-} ca Mg m_{-} mg K m_{-} k Na m_{-} na O m_{-} o_2$$

Энтальпия образования золы при её известном составе может быть определена по следующей зависимости:

$$\Delta H_{Zol}^0 = mm_{SiO_2} \cdot \Delta H_{SiO_2}^0 + mm_{Al_2O_3} \cdot \Delta H_{Al_2O_3}^0 +$$

$$+ mm_{TiO_2} \cdot \Delta H_{TiO_2}^0 + mm_{CaO} \cdot \Delta H_{CaO}^0 + mm_{MgO} \cdot \Delta H_{MgO}^0 +$$

$$+ mm_{K_2O} \cdot \Delta H_{K_2O}^0 + mm_{Na_2O} \cdot \Delta H_{Na_2O}^0 \quad (3)$$

где mm_i - количество молей вещества i (моль/кг), ΔH_i^0 - энтальпия образования i -ого вещества (кДж/моль).

Для определения энтальпии образования горючих отходов может быть использована следующая зависимость [2]:

$$\Delta H_{ТБО}^0 = m \cdot \Delta H_{CO_2}^0 + \frac{n}{2} \cdot \Delta H_{H_2O}^0 + s \cdot \Delta H_{SO_2}^0 + \frac{Zol}{1000} \cdot \Delta H_{Zol}^0 + \cdot Q_H^p \quad (4)$$

где ΔH_i^0 – энтальпия образования i -ого вещества, кДж/моль; Q_H^p – низшая теплота сгорания ТБО, которая определяется экспериментально при сжигании в калориметрической бомбе или по литературным данным, кДж/кг.

Результатами решения системы уравнений являются $\cdot V_{CH_4}$, $\cdot V_{CO}$, $\cdot V_{CO_2}$, $\cdot V_{N_2}$, $\cdot V_{H_2}$, $\cdot V_{H_2O}$, V_{sum} , $m^3/кг$, K_{p1} , K_{p2} - константы равновесия реакций водяного газа и паровой конверсии метана, T_{22} - адиабатическая температура процесса, К.

Апробация предложенной математической модели проводилась путём сравнения расчётов с данными, полученными в [2].

Таблица 1. Сравнение расчетных данных и данных, приведенных в [2]

Равновесные концентрации основных компонентов (объемная доля), %										
	N ₂	H ₂	H ₂ O	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	COS	NH ₃	t _{гр} , °C
[2]	49,7	14,9	3,07	28,1	3,9	0,2	0,05	0,004	0,011	950
Расчёт	48,9	15,8	2,4	30,2	2,6	5,73*10 ⁻⁴	-	-	-	1088

Таблица 2. Результаты расчёта для ТБО

Равновесные концентрации основных компонентов (объемная доля), %						
N ₂	H ₂	H ₂ O	CO	CO ₂	CH ₄	t _{гр} , °C
18,05	39,582	4,925	35,6	1,843	3,651*10 ⁻⁴	1183

Следовательно, полученную модель можно применять для расчетов процессов термохимической переработки (утилизации) углеродосодержащих отходов.

Литература

1. Самуйлов Е. В., Корценштейн Н. М., Лебедева Л. Н., Шевелева Н. А. Энтальпии образования энергетических углей из элементов в стандартных состояниях и расчёт газификации бурых углей как пример использования энтальпии образования, М., 2002 г.
2. «Теплоэнергетика и теплотехника» под ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина, М.: Издательство МЭИ, 2001 г.

УДК 621.1

В.А. ИППОЛИТОВ, к.т.н., доцент,
М.В. КОПКОВ, А.Н. МОИСЕЕВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Научный исследовательский университет МЭИ»
111250 г. Москва, ул. Красноказарменная 14
E-mail: ippolitovVA@mpei.ru

Расчетно-экспериментальное определение теплоты сгорания альтернативного топлива

Аннотация: Данные, полученные расчетным путем, были подтверждены результатами экспериментальных исследований. Что говорит о верности вычисления программы в MathCAD, и о достоверности результатов.

Ключевые слова: альтернативное топливо, ТБО, RDF, calorиметрическая бомба, теплотворная способность.

V.A. IPPOLITOV *Ph.D., Associate Professor*,
M.V. KOPKOV, *bachelor*, A.N. MOISEEV, *bachelor*

Federal State Educational Institution of Higher Professional Education "Researcher
University of MPEI"

111250 Moscow, ul. Krasnokazarmennaya 14. *E-mail: IppolitovVA@mpei.ru*

Design and experimental determination of the heat of combustion of alternative fuels

Abstract. Data obtained by calculation, were confirmed by experimental studies. Indicating that the calculation of loyalty programs MathCAD, and reliability of the results.

Key words: alternative fuel, MSW, RDF, calorimetric bomb, the calorific value.

Ежегодно в России образуется более 60 млн. тонн мусора. На одного человека приходится около 400 кг отходов в год. При этом только 7-8% от общего количества мусора подвергается вторичной переработке, остальной объем отправляется на захоронение.[1]

Захоронение – метод давно устаревший и постепенно исчерпывающий себя. При захоронении происходит загрязнение не только больших площадей земли, но и грунтовых вод и водоемов, находящихся поблизости.

Немалую популярность в нашей стране имеет сжигание отходов. Технология проверенная и позволяющая сократить количество отходов. Но и сжигание в свою очередь имеет недостатки, основным из которых является загрязнение воздуха вредными веществами, которые содержатся в продуктах сгорания ТБО.

По данным компании «Ростехнологии» более 40% накопившегося в стране мусора представляет собой ценное сырье.[2] При правильном обращении с отходами мы можем получить из отхода весьма ценный и возобновляемый источник энергии. Примером может служить топливо RDF, которое широко применяется во многих европейских странах, Японии и США.

RDF (refuse derived fuel) переводится, как топливо, полученное из отходов. Для производства RDF используются следующие фракции мусора и отходов: бумага, картон, бытовые органические отходы, дерево, кожа (кожзаменители), резина, синтетические волокна, текстиль, пластик, полимеры. В общем, все то, что содержится в мусоре и отходах за исключением стекла, камней, металлов и хлорсодержащих материалов.

Сам процесс производства RDF состоит из сепарации, измельчения и обезвоживания мусора. Зачастую применяется прессовка с целью получения пеллетов.[3] В результате этих операций получается горючая фракция размером 20-60 мм (в зависимости от требований предприятий, где будет применяться данный вид топлива). Теплота сгорания RDF варьируется от 12 до 20 кДж/кг. При этом существуют

пути увеличения теплотворной способности путем добавления в состав компонентов с высокой калорийностью.

В ходе работы был выведен элементарный состав RDF применительно к России. Для определения ценности данного вида топлива была составлена программа для расчета теплотворной способности в зависимости от его состава. Для подтверждения данных расчетов и исследования характеристик RDF были проведены испытания в лабораторных условиях по определению теплоты сгорания.

Испытания проводились в калориметрической бомбе немецкого производства IKA C 2000 basic. Данный калориметр предназначен для определения высшей теплотворной способности жидких и твердых материалов. [4]

Отличительными чертами калориметрических систем являются:

- Измерение и расчет высшей теплотворной способности согласно стандартам DIN 51900, ISO 1928, ASTM D240, ASTM D4809, ASTM D5865, ASTM D1989, ASTM D5468, ASTM E711.
- Эксперименты проводятся в различных режимах: адиабатическом, изопериболическом и динамическом.

RDF был спрессован в таблетки с помощью пресс-гранулятора. Компонентный состав полученного RDF представлен в табл. 1.

Таблица 1. **Компонентный состав RDF**

Вещество	Процентный состав
Бумага	46.7
Древесина	13
Текстиль	18.2
Резина, кожа	17
Отходы шерстяного волокна	5.1

В ходе эксперимента получены следующие данные:

Таблица 2. **Данные эксперимента**

Номер опыта, №	Масса пробы, $M_{пр}$, г	Высшая теплота сгорания, $Q_{вп}$, Дж/кг	Низшая теплота сгорания, $Q_{нп}$, Дж/кг
1	0.929	17802	16723
2	1	17653	16600

Высшая теплотворная способность (Q^P_B) образуется как частное количества высвободившегося при сгорании твердого или жидкого вещества тепла и массы пробы.

Низшая теплотворная способность (Q^P_H) равна высшей теплотворной способности, уменьшенной на количество энергии конденсации воды, содержащейся в пробе.

Низшая теплотворная способность является более важным параметром с технической точки зрения, так как во всех основных технических методиках только теплота сгорания может быть выражена в виде энергии.

В результате проведенных исследований было выяснено, что значения высшей теплотворной способности экспериментальных и расчетных данных совпадают с точностью до 4%.

Резюмируя можно сделать вывод, что RDF возможно использовать как в цементной промышленности, так и на объектах энергетики (котельные, ТЭС). Применение RDF позволяет частично заместить основные виды топлива: угля, нефти, газа, что позволяет снизить зависимость экономики от ископаемого топлива, а также снизить себестоимость производимой продукции.

Литература

1. <http://mnr.gov.ru/> - Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации.
2. <http://ztbo.ru/o-tbo/stati/stranni/pererabotka-musora-tbo-v-rossii> - Статья "Переработка мусора в России".
3. Журнал «Перспектива» 2012 г. №2
4. http://www.ika.ru/ika/product_art/manual/ika_c_2000_russian.pdf - Руководство пользователя ИКА Калориметр С 2000 basic С 2000 control.

Ипполитов Владимир Андреевич,
Национальный исследовательский университет МЭИ,
e-mail: IVA_48@mail.ru

Копков Максим Владимирович,
Национальный исследовательский университет МЭИ,
e-mail: hashemin@mail.ru

Моисеев Александр Николаевич,
Национальный исследовательский университет МЭИ
e-mail: family2019@yandex.ru

УДК 620.92

В.В. КЛЮКВИН, аспирант,
В.И. СУББОТИН, науч. рук. к.т.н., профессор

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

Определение параметров и количества истекаемой пароводяной смеси из дренажа и параметров пара в точке организации дренажа

Имеется некий магистральный паропровод оборудованный дренажем из которого истекает пароводяная смесь. Подобная ситуация нередка в существующих паровых сетях. Дренажи организуют в местах вероятного образования конденсата. Поэтому возникает вопрос о количестве и о параметрах истекаемой смеси, а, следовательно целесообразности организации дренажа.

Определение параметров истекаемой из дренажа пароводяной смеси предлагается определять с помощью мобильной теплоизолированной ёмкости с холодной водой оборудованной термометром и весами – рис. 1. Также для измерений требуется секундомер.

Метод измерения основан на определении изменения во времени энергетической и массовой характеристик холодной воды при истечении в ее объем пароводяной смеси из дренажа.

Пред началом измерений фиксируем начальные параметры емкости с холодной водой: t_1 – температура холодной воды до измерений [$^{\circ}\text{C}$]; m_1 – масса холодной воды до измерений [кг];

Все измерения следует проводить в необходимых СИЗ. Опасным фактором в данной ситуации является высокая температура пароводяной смеси, поверхности паропровода, дренажного шланга и измерительной емкости.

Подготавливаем секундомер. Емкость устанавливаем таким образом, чтобы в ее можно было удобно опустить дренажный шланг. Пускаем дренажный шланг в емкость и запускаем секундомер.

Истечение пароводяной смеси в емкость холодной водой обычно сопровождается гидроударами в измерительной емкости, что является нормальным. Во время эксперимента контролируем температуру воды в емкости. При приближении ее к 60°C (установлено эмпирически), вода в емкости не может полностью сконденсировать пар из дренажа. Поэтому при первых признаках бурления необходимо извлечь дренажный шланг из емкости, остановить секундомер и зафиксировать конечные параметры системы: t_2 – температура воды после измерений [$^{\circ}\text{C}$]; m_2 – масса воды после измерений [кг]; τ – время проведения эксперимента [сек].

Определяем массовый расход паровой смеси из выражения:

$$G = \frac{m_2 - m_1}{\tau} \cdot 3600, \left[\frac{\text{кг}}{\text{час}} \right] \quad (1)$$

Определяем расход энергии из выражения:

$$Q = \frac{C_p \cdot (m_2 \cdot t_2 - m_1 \cdot t_1)}{\tau} \cdot 3600, \left[\frac{\text{ккал}}{\text{час}} \right] \quad (2)$$

Определяем энтальпию истекаемой из дренажа пароводяной смеси из выражения:

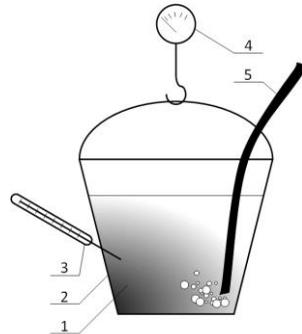


Рис. 1.

- 1 – вода, 2 – емкость,
3 – термометр, 4 – весы,
5 – дренажный шланг

$$h = \frac{Q}{G}, \left[\frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \right] \quad (3)$$

Далее по теплофизическим таблицам состояния воды и водяного пара определяется остальные параметры при атмосферном давлении.

Если энтальпия меньше 638,9 ккал/кг то необходимо вычислить степень сухости истекаемой паровой смеси при атмосферном давлении (глубиной погружения дренажного шланга в воду пренебрегаем):

$$x = \frac{h - h'}{h'' - h'} = \frac{h - h'}{r}, \quad (3)$$

где: h' – энтальпия на линии насыщения при атмосферном давлении [ккал/кг]; h'' – энтальпия на линии парообразования при атмосферном давлении [ккал/кг]; r – скрытая теплота парообразования при атмосферном давлении [ккал/кг].

Приведенные вычисления не учитывают потери в окружающую среду от емкости, которыми пренебрегаем ввиду кратковременности измерений. Также пренебрегается сопротивление возникающее при истечении в жидкость против истечения в атмосферу, ввиду того что в обоих случаях истечение критическое, а следовательно скорость пароводяной смеси не меняется.

Далее определим параметры пара в точке организации дренажа. На рис. 2 приведена схема паропровода с дренажем. Параметры пара в точке А были определены выше. Для определения параметров в точке В, необходимо измерить температуру, а также определить потери теплоты через стенку дренажа в окружающую среду.

Для определения тепловых потерь ($Q_{\text{пот.д.}}$) в дренаже от паропровода до точки А по закону Ньютона–Рихмана, необходимо измерить температуру поверхности и геометрические параметры (площадь поверхности теплоотдачи). Коэффициент теплоотдачи выбирается исходя из условий и параметров окружающей среды.

Определив тепловые потери в дренаже и зная расход пароводяной смеси через дренаж и энтальпию в точке А - вычислим энтальпию в точке В:

$$h_B = \frac{Q_{\text{пот.д.}}}{G}, \left[\frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \right] \quad (4)$$

Измерение температуры паропровода осуществляется любыми контактными портативными термометрами, и обычно не представляет труда.

Зная температуру и энтальпию по теплофизическим таблицам состояния воды и водяного пара определяется остальные параметры.

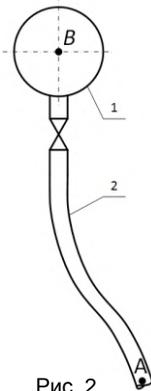


Рис. 2
1 – паропровод,
2 – дренаж

Разработанная методика может быть реализована в виде компьютерной программы. Где исходными данными являются начальные и конечные температура и масса воды в емкости, время истечения. Дополнительными исходными данными являются температура в точке организации дренажа на паропроводе, средняя температура поверхности дренажа и его геометрические характеристики. В результате расчета программа определяет массовый и объемный расходы пароводяной смеси, расход теплоты, энтальпию, температуру, плотность, степень сухости истекаемой смеси. Дополнительно программа позволяет определить потери тепловой энергии от поверхности дренажа, и параметры пара в месте организации дренажа (давление, энтальпию и т.д.).

Предлагаемый метод позволяет определить параметры пара на выходе дренажа и месте организации дренажа в магистрали. Метод может быть использован для определения необходимости организации дренажа, для определения эффективности работы теплообменного оборудования или спутникового обогрева, для выбора типа конденсатоотводчика, и т.д.

Метод был опробован при обследовании системы пароснабжения Московского нефтеперерабатывающего завода и зарекомендовал свою эффективность и высокую точность. Метод позволил быстро определить параметры пара в узловых элементах сети и эффективно проанализировать режим работы паровой сети, а также разработать и обосновать энергосберегающие мероприятия с годовой экономией 200 млн.руб./год.

Литература

1. **Калайда Ю.А.** Истечение теплоносителя при потере герметичности реакторного контура. - М.: Атомиздат.1977.
2. **Вукалович М.П., Новиков И.И.** Термодинамика. - М.: Машиностроение.1977.
3. **Сборник Н.Т.** Транспорт природного газа. - М.: ВНИИГАЗ.1984.
4. **Фисенко В.В.** Сжимаемость теплоносителя и эффективность работы контуров циркуляции ЯЭУ. - М.: Энергоатомиздат.1987.

УДК 532.542

А.В. КОНОВАЛОВ, к.т.н, доцент; В.В. СЕННИКОВ, к.т.н, доцент
С.В. АНДРЕЕВ, студент; А.А. СМИРНОВ, студент

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

К расчету показателей надежности тепловых сетей при разработке схем теплоснабжения

Аннотация. Приведена методика расчёта показателей надёжности тепловых сетей при разработке схем теплоснабжения. Даны рекомендации по доведению показателей надежности до нормативных значений. Выполнены

расчеты показателей надёжности для схемы теплоснабжения городского округа с числом жителей более 25 тыс. чел. и для локальной схемы теплоснабжения микрорайона ИГЭУ от водогрейной котельной.

Ключевые слова: Надёжность, показатели надёжности, теплоснабжение.

A.V. KONOVALOV, Candidate of Engineering, docent,
V.V. SENNIKOV, Candidate of Engineering, docent,
S.V. ANDREEV, student,
A.A. SMIRNOV, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34.
E-mail: kbispu@mail.ru, konovalov@pte.ispu.ru

On the calculation of reliability indices of thermal networks in the development of district heating schemes

Abstract. The methodology of calculation of indicators of reliability of heat networks in the development of heating schemes. Recommendations to bring reliability indices to normative values. Calculations of indices of reliability for the circuit heating urban district with a population of over 25 thousand people and for the local district heating schemes ISPU of water boiler.

Key words: Reliability, performance reliability, heat

Цели расчета показателей надёжности (ПН) системы теплоснабжения – количественная оценка надёжности теплоснабжения потребителей системы централизованного теплоснабжения и обоснование необходимых мероприятий по достижению требуемой надёжности для каждого потребителя. Объект исследования – тепловые сети и подключенные к ним узлы потребления тепловой энергии.

Методика решения этих задач [1] определяется технологическими особенностями процессов теплоснабжения и свойствами тепловой сети как объектов исследования надёжности. Тепловые сети в системе централизованного теплоснабжения являются пространственными нелинейными сетевыми структурами с произвольной топологией и большим числом узлов-потребителей, имеющих разнородную тепловую нагрузку (отопления, вентиляции, горячего водоснабжения, технологических процессов) и предъявляющих различные требования к надёжности теплоснабжения. Важным свойством тепловых сетей является малая вероятность полного отказа системы. Для систем теплоснабжения с большим количеством элементов характерны частичные отказы, приводящие к отключению или снижению уровня теплоснабжения одного или части потребителей. Социальный характер систем теплоснабжения также требует рассматривать проблему надёжности со стороны потребителей, отражая их требования к бесперебойности теплоснабжения, и оценивать не надёжность системы, а надёжность теплоснабжения потребителей. Другая важная особенность тепловой сети явля-

ется наличие временного резерва, который создается аккумулирующей способностью отапливаемых зданий, а также возможностью некоторого снижения температуры воздуха в зданиях против расчетного значения во время восстановления теплоснабжения после отказа.

Наиболее ненадежным звеном системы централизованного теплоснабжения являются тепловые сети, особенно при их подземной прокладке. Это, в первую очередь, обусловлено низким качеством применяемых ранее конструкций теплопроводов, тепловой изоляции, запорной арматуры, недостаточным уровнем автоматического регулирования процессов передачи, распределения и потребления тепловой энергии, а также все увеличивающимся моральным и физическим старением тепловых сетей из-за хронического недофинансирования работ по их модернизации и реконструкции. Кроме того, структура тепловых сетей в крупных системах не соответствует их масштабам.

При разработке схем теплоснабжения требуется решить два типа задач, связанных с расчетами надежности. Во-первых, это расчет ПН теплоснабжения потребителей по характеристикам надежности элементов тепловой сети для заданных схем и параметров сети (задачи анализа надежности). Во-вторых, выбор и корректировка схемы и параметров тепловой сети на рассматриваемую перспективу с учетом нормативных требований к надежности теплоснабжения потребителей - задачи синтеза (построения) надежной сети.

Понятия отказов функционирования, соответствующих расчетному и пониженному уровням теплоснабжения, формулируются с позиций потребителей как снижение температуры воздуха в зданиях ниже граничного значения. Для расчетного уровня теплоснабжения это граничное значение соответствует расчетной температуре воздуха в здании, для пониженного уровня - нормам, установленным [1]. Пониженный уровень поддерживается во время ликвидации отказов в резервируемой части сети и характеризуется подачей резервной (аварийной) нормы теплоты потребителям, нормируемой в [1]. Величина этой нормы определяет транспортный резерв сети.

Надежность расчетного уровня теплоснабжения потребителей оценивается коэффициентом готовности K_j , представляющим собой вероятность того, что в произвольный момент времени будет обеспечен расчетный уровень теплоснабжения j -го потребителя (среднее значение доли отопительного сезона, в течение которой теплоснабжение j -го потребителя не нарушается). Надежность пониженного уровня теплоснабжения потребителей оценивается вероятностью безотказной работы P_j , представляющей собой вероятность того, что в течение отопительного периода температуре воздуха в зданиях j -го потребителя не опустится ниже граничного значения.

В задачах синтеза, т.е. построения надежных тепловых на рассматриваемую перспективу, обоснование мероприятий, обеспечиваю-

щих выполнение требований [1] к надежности теплоснабжения, производится на основе достижения двух следующих условий.

Вероятностные ПН должны удовлетворять нормативным значениям:

$$K_j \geq K_r, j \in J \quad (1)$$

$$P_j \geq P_{rc}, j \in J \quad (2)$$

где $K_r = 0,97$ – нормативное значение коэффициента готовности;

$P_{rc} = 0,9$ – нормативное значение вероятности температуры воздуха в зданиях j -го потребителя не опустится ниже граничного значения теплоснабжения потребителей;

J – множество узлов расчетной схемы ТС, к которым подключены потребители тепловой энергии.

Потребители во время отказов участков резервируемой части сети должны получать аварийную норму тепла φ_n^{ab} (3). Величина φ_n^{ab} нормирована в [1] в зависимости от диаметра теплопровода и расчетной температуры наружного воздуха.

Интенсивность отказов элементов тепловой сети также является важным элементом ПН. Расчет интенсивности отказов теплопроводов λ с учетом времени их эксплуатации производится по зависимостям распределения Вейбулла при начальной интенсивности отказов 1 км однолинейного теплопровода равной 0,05 1/(км·год). В соответствии с этой зависимостью 1 км теплопровода с паспортным сроком службы 25 лет в нормальных условиях эксплуатации, как правило, отказывает не более одного раза за 20 лет ($1/20=0,05$). За пределами 25-летнего срока эксплуатации теплопроводов, интенсивность их отказов резко возрастает, что и определяет необходимость их первоочередной замены. Алгоритм расчета показателей надежности теплоснабжения потребителей согласно [2] приведен в табл. 1.

Доведение показателей надежности теплоснабжения потребителей до нормативных значений и обоснование объема резервирования тепловой сети требуют проведения нескольких этапов расчетов с принятием определенных решений на каждом из них. Расчет ПН тепловой сети выполняется в следующей последовательности:

- вначале выявляются участки тепловой сети с высокими значениями параметров потока отказов и определяют коэффициенты готовности K_j и значения вероятности безотказной работы P_j ;

- значения K_j и P_j сравнивают с нормативными значениями K_r и P_{rc} (1-3) и при их отклонении в ту или другую сторону разрабатываются мероприятия по улучшению показателей надежности (табл. 2);

- подсчитанные новые значения ПН вновь сравниваются с нормативными. При соблюдении условий (1-3) принимается оптимальный вариант программы мероприятий.

Таблица 1. Алгоритм расчета показателей надежности тепловых сетей

Этап	Наименование показателя надёжности	Формула
1	Интенсивность отказов элементов ТС	$\lambda = \lambda^{\text{нрч}} \cdot (0,1 \cdot \tau^{\text{экспл}})^{\alpha-1}$
	Параметр потока отказов элементов ТС	$\omega = \lambda \cdot L$
	Время восстановления элементов ТС	$z^{\text{в}} = a \cdot [1 + (b + c \cdot L_{\text{ср}}) \cdot d^{1,2}]$
	Интенсивность восстановления элементов ТС	$\mu = \frac{1}{z^{\text{в}}}$
2	Вероятность рабочего состояния ТС	$p_0 = \left(1 + \sum_{i=1}^N \frac{\omega_i}{\mu_i}\right)^{-1}$
	Вероятность состояния ТС с отказами элементов	$p_f = \frac{\omega_f}{\mu_f} \cdot p_0$
3	Моделирование отказов и расчёт послеаварийных гидравлических режимов	-
4	Температура воздуха в здании потребителя в конце периода восстановления элементов ТС	$t_{j,f}^{\text{в}} = t^{\text{нр}} + \frac{t_j^{\text{вп}} - t^{\text{нр}} - \bar{q}_{j,f} \cdot (t_j^{\text{вп}} - t^{\text{нр}})}{e \left(\frac{\alpha}{\beta_j}\right)} + \bar{q}_{j,f} \cdot (t_j^{\text{вп}} - t^{\text{нр}})$
	Температура наружного воздуха $t_{j,f}^{\text{пав}}$, при которой время восстановления f-го элемента равно временному резерву j-го потребителя	$t_{j,f}^{\text{пав}} = \frac{t_j^{\text{вп}} - \bar{q}_{j,f} \cdot (t_j^{\text{вп}} - t^{\text{нр}}) - (t_{j,\text{мин}}^{\text{вп}} - \bar{q}_{j,f} \cdot (t_j^{\text{вп}} - t^{\text{нр}}))}{1 - e \left(\frac{\alpha}{\beta_j}\right)}$
	Определения числа часов стояния температуры наружного воздуха ниже $t_{j,f}^{\text{пав}}$	$\tau_{j,f}^{\text{пав}} = \tau^{\text{хол}} + (\tau^{\text{от}} - \tau^{\text{хол}}) \cdot \left(\frac{t_{j,f}^{\text{пав}} - t^{\text{нр}}}{8 - t^{\text{нр}}}\right)^{\frac{\tau^{\text{нр}} - \tau^{\text{нр}}}{8 - \tau^{\text{нр}}}}$
5	Коэффициент готовности	$K_j = p_0 + \sum_{f \in F_j} p_f$
6	Вероятность безотказного теплоснабжения	$P_j = e^{-[p_0 \cdot \sum_f (\omega_f \cdot \tau_{j,f}^{\text{пав}})]}$

Нами были выполнены расчеты ПН для схемы теплоснабжения городского округа с числом жителей более 25 тыс. чел. и для локальной схемы теплоснабжения микрорайона ИГЭУ от водогрейной котельной.

Результаты расчета ПН тепловых сетей городского округа: коэффициенты готовности K_j , характеризующий надежность расчетного уровня теплоснабжения потребителей, для тупиковой тепловой сети городского округа, имеют значения значительно ниже нормативных.

Таблица 2. Рекомендации по доведению показателей надежности до нормативных значений [2]

$K_j \geq K_g$, $P_j < P_{тс}$	Замена участков сети с высокими значениями параметра потока отказов; Снижение времени восстановления: <ul style="list-style-type: none"> - численный состав и оснащённость АВС; - секционирование ТС; - наземная прокладка. Увеличение объёма резервирования, начиная с головных участков и наращивая к периферии; <ul style="list-style-type: none"> - Перемычки между магистралями, тепловыми районами с диаметрами, равными наибольшему диаметру смежных участков; - Дублирование участков сети; - Увеличение диаметров участков; Увеличение располагаемого напора на источнике во время отказов.
$K_j < K_g$	Замена участков сети с высокими значениями параметра; Снижение времени восстановления. Если результат не достигнут, это означает, что масштабы системы завышены, мощность источника и радиус его действия должны быть уменьшены (новый источник, переключение части потребителей на другие источники)
$\frac{q_j}{q_j^p} < \varphi_n^{ав}$	Увеличение диаметров участков кольцевой части сети с завышенными удельными потерями давления; Увеличение располагаемого напора на коллекторах источника.

Согласно данным табл. 2 для доведения показателей надежности до нормативных значений необходима перекладка участков тепловых сетей с высокими значениями параметров потока отказов.

Результаты расчета ПН тепловых сетей микрорайона ИГЭУ: коэффициенты готовности K_j и вероятности безотказной работы P_j , характеризующие надежность расчетного и пониженного уровня теплоснабжения потребителей, имеют значения выше нормативных, т.к. рассматриваемая тепловая сеть имеет небольшие масштабы (присоединенная нагрузка, радиусы теплоснабжения, диаметры головных участков).

Литература

1. СП 124.13330.2012 Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003.
2. Сеннова Е.В., Кирюхин С.Н. Методика и алгоритм расчета надежности тепловых сетей при разработке схем теплоснабжения городов [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые дан. – Москва: 2013.- Режим доступа: http://www.rosteplo.ru/Npb_files/metod_1590.pdf

Коновалов Анатолий Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,

кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики,
e-mail: konovalov@pte.ispu.ru
Сенников Владимир Васильевич,
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной теплоэнергетики,
e-mail: kbispu@mail.ru

УДК 532.542

А.В. КОНОВАЛОВ, к.т.н, доцент; В.В. СЕННИКОВ, к.т.н, доцент
С.В. АНДРЕЕВ, студент; А.А. СМИРНОВ, студент

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

Особенности применения в тепловых пунктах централизованного теплоснабжения термогидравлического распределителя

Аннотация. Рассмотрены вопросы использования термогидравлического распределителя (ТГР) в схеме централизованного теплоснабжения. ТГР позволяет обеспечить гидравлическую независимость контуров отопления, вентиляции и ГВС потребителей от сетевого контура, а также независимость контура отопления (вентиляции) от изменения нагрузки контура ГВС.

Ключевые слова: Термогидравлический распределитель, Централизованное теплоснабжение, отопление, вентиляция, гвс.

A.V. KONOVALOV, Candidate of Engineering, docent,
V.V. SENNIKOV, Candidate of Engineering, docent,
S.V. ANDREEV, student,
A.A. SMIRNOV, student

Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kbispu@mail.ru, konovalov@pte.ispu.ru

Features of the application in the thermal areas of district heating thermal-hydraulic spreader

Abstract. The article examines the use of the thermal-hydraulic dispenser (THD) in the district heating scheme. THD allows providing hydraulic independence of the contours of heating, ventilation and domestic hot water consumers from the network circuit, and of the independence of the heating circuit (ventilation) of the load change of the domestic hot water circuit.

Key words: The thermal-hydraulic dispenser, district heating, heating, ventilation, domestic hot water.

В патентах на полезную модель [1,2] авторами обосновано преимущество использования термогидравлического распределителя

(ТГР) для систем централизованного теплоснабжения. В тепловом пункте «Гараж» ИГЭУ проведена реконструкция с установкой ТГР. За последние 2 года эксплуатация теплового пункта (ТП) с ТГР выявились как преимущества, так и недостатки его использования. Тепловой пункт «Гараж» выполнен по одноступенчатой параллельной схеме присоединения теплообменника водонагревателя горячего водоснабжения (ГВС) с зависимым непосредственным присоединением систем отопления при отсутствии в схеме ТП регулятора перепада давлений на отопление. Регулятор перепада давлений поддерживает автоматически постоянным заданный перепад давления на входе системы отопления. При изменении нагрузки ГВС происходит изменение значения расхода сетевой воды на вводе в ТП, при этом клапан регулятора давления открывается в нужную сторону для поддержания давления постоянным на выходе из регулятора независимо от его перепада на входе. На практике в ТП «Гараж» ИГЭУ регуляторы давления не установлены.

Нагрузка на ГВС имеет переменный характер в течение суток. К ТП «Гараж» ИГЭУ подключены нагрузки ГВС ряда близлежащих зданий. Изменение расхода воды на подогреватели ГВС в первичном контуре происходит под воздействием регулятора температуры. При расходе воды на ГВС, соизмеримым с расходом воды на отопление, расход воды на отопление уменьшается. Кроме того, происходит изменение расхода сетевой вода через источник теплоснабжения. Для обеспечения постоянства расхода воды на отопление от изменения нагрузок на ГВС в ТП установлен ТГР. Более подробно о преимуществе использования ТГР в схеме ТП описано в [1,2].

Практическое использование котельных тепловых схем с ТГР позволяет обеспечить независимость контуров, повысить надежность теплоснабжения потребителей и снизить затраты энергоресурсов. Надежный гидравлический принцип работы ТГР, не требующий регулирования расходов, обеспечивает независимость и бесперебойное функционирование подключенных контуров потребителей.

Для повышения располагаемых напоров у удаленных потребителей можно по длине тепловой сети установить повысительные насосные станции на прямой и обратной линиях. При этом значительно увеличивается расход электроэнергии на перекачку теплоносителя и снижается устойчивость тепловой сети по поддержанию расчетных расходов теплоносителя у потребителей. Применение ТГР позволяет решить вопрос теплоснабжения потребителей даже при значениях располагаемых напоров в 5–10 м. вод. ст. с минимальными энергозатратами. В современных городских тепловых сетях остро стоит вопрос о наладке гидравлического режима тепловой сети: располагаемый напор у каждого потребителя должен быть не менее минимально допустимого – иначе становится невозможным поддерживать температурный режим в зданиях на требуемом уровне.

Для присоединения дополнительного потребителя необходимо проведение нового наладочного гидравлического расчета тепловой сети. Если сеть потребителя можно гидравлически отделить от подводящих сетей, установив термогидравлический распределитель, вопрос о наладке может быть исключён.

Принципиальная тепловая схема источника с использованием ТГР представлена на рис. 1. Схема состоит из двух контуров и двух узлов А и В.

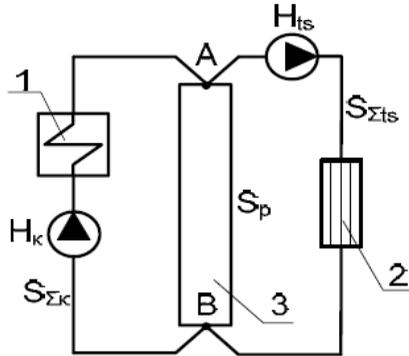


Рис. 1. Принципиальная схема источника теплоснабжения термогидравлическим распределителем: 1 – источник тепловой энергии; 2 – потребитель; 3 – ТГР

Кроме того, подключение потребителей через ТГР имеет и другие преимущества: потребителям будет отпущаться столько теплоты, сколько им необходимо для компенсации тепловых потерь зданием в данный момент; невостребованное количество тепловой энергии через ТГР возвращается источнику.

Моделирование режимов работы системы теплоснабжения ИГЭУ без установки ТГР и с установкой ТГР в ТП «Гараж» ИГЭУ при различных значениях коэффициента изменения нагрузки ГВС (изменения значения нагрузки по сравнению с расчетным значением) выполнено в программно-расчетном комплексе (ПРК) ZuluThermo 7.0. Так как, расчетная схема подключения потребителей с ТГР в ПРК отсутствует была реализована независимая схема подключения системы отопления с расчетным располагаемым напором 5 м. вод. ст. и расходом, равным сумме расходов воды на отопление и ГВС с 10% запасом на предотвращение подмеса холодной воды из обратного трубопровода в ТГР.

Так же были проведены измерения расходов сетевой воды на ГВС потребителей ТП «Гараж» с помощью ультразвукового расходомера.

Результаты расчетов режимов работы системы теплоснабжения следующие:

1. Существующая схема подключения ТП:

При изменении коэффициента нагрузки ГВС расход воды в первичном и вторичном контуре ГВС меняется; так же изменяется расход воды на отопление. Общее изменение расхода сетевой воды на ТП негативно влияет на работу источника теплоснабжения;

2. Схема подключения ТП «Гараж» с ТГР:

При изменении коэффициента нагрузки ГВС потребителей, расход воды на отопление и общий расход воды на ТП остаются постоянными.

Таким образом, применение ТГР в схеме централизованного теплоснабжения позволяет обеспечить гидравлическую независимость контуров отопления, вентиляции и ГВС потребителей от сетевого контура; также обеспечивается независимость контура отопления (вентиляции) от изменения нагрузки контура ГВС.

Так как гидравлически контура потребителей независимы от распределительных контуров сети при установке ТГР появляется возможность:

А. подключения потребителей, имеющих низкое значение предполагаемого перепада на входе в ТП зданий, порядка 0,5 м. вод. ст.

В. проведения наладочных работ на ИТП отдельных зданий, которые не оказывают влияние на изменение потокораспределения в общей тепловой сети.

Литература

1. **Сенников В.В., Генварев А.А.** Патент на полезную модель № 122753 от 03.08.2012. Тепловой пункт с термогидравлическим распределителем системы централизованного теплоснабжения.
2. **Яворовский Ю.В., Сенников В.В., Полуэктова Т.Ю.** Патент на полезную модель № 126097 от 24.09.2012. Схема теплового пункта централизованной системы теплоснабжения для подключения потребителей с недостаточным располагаемым напором теплоносителя.
3. **Соколов Е.Я.** Теплофикация и тепловые сети. – М.: Изд-во МЭИ, 2001.
4. **Меренков А.П., Хасилев В.Я.** Теория гидравлических цепей. – М.: Наука, 1985.
5. **Альтшуль А.Д., Животовский Л.С., Иванов Л.П.** Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1987.
6. **Зингер Н.М.** Гидравлические и тепловые режимы теплофикационных систем. – М.: Энергия, 1976.

Коновалов Анатолий Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: konovalov@pte.ispu.ru

Сенников Владимир Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kbispu@mail.ru

УДК 621.181.123

Д.А. КОРОЛЬКОВ, бакалавр техники и технологии

Национальный Исследовательский Университет
Московский Энергетический Институт
111250 Москва, ул. Красноказарменная, 17
E-mail: rp4@modks.com

Оптимизация тепловой схемы блочно-модульной котельной с предвключенным экономайзером переменной конфигурации

Аннотация. Произведены расчеты с целью оптимизации работы блочно-модульной котельной в составе трех паровых котлов Viessmann (Германия) модели 200-HS после ее реконструкции (модернизации) путем установки предвключенных ступеней экономайзера переменной конфигурации.

Ключевые слова: блочно-модульная котельная, паровые котлы, экономайзер.

D.A. KOROLKOV, Bachelor of Engineering and Technology

National Research University
Moscow Power Engineering Institute
11250, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 34. *E-mail: rp4@modks.com*

Optimization of thermal scheme modular boiler with economizer upstream configuration variable

Abstract. Calculations are made in order to optimize the operation of a modular boiler of three steam boilers Viessmann (Germany) Model 200 -HS after reconstruction (modernization) by setting the upstream stages of economizer configuration variable .

Key words: modular boiler , steam boiler , economizer.

На российском рынке блочно-модульные котельные появились сравнительно недавно, но многие предприятия отдают им предпочтение при строительстве новых объектов и реконструкции существующих котельных. В связи с интенсивным развитием данной отрасли в последние годы и, как следствие, растущей конкуренцией, компании-производители БМК ищут эффективные способы повышения КПД котельных, снижения затрат на изготовление, сокращения сроков производства.

Одним из способов повышения КПД энергоцентра является утилизация теплоты уходящих газов (продуктов сгорания) за счет установки экономайзера. На данный момент на рынке, в том числе и на российском, существуют различные варианты экономайзеров, но все они малоэффективны. Данные теплообменники предназначены под конкретную марку и модель котла. В случае их выхода из строя не

представляется возможным отремонтировать их в короткие сроки и без привлечения квалифицированного персонала. При обнаружении неисправности теплообменник меняется целиком, для чего необходимо останавливать котел и ожидать поставки аналогичного изделия несколько дней, а иногда и недель. Помимо этого, установку подобных экономайзеров не всегда удается реализовать при реконструкции уже существующих котельных ввиду их значительных габаритов и малой степени унификации.

Учитывая все вышеизложенное, а также принимая во внимание сложную экономическую ситуацию и повсеместно внедряемую политику импортозамещения, возникает задача разработки экономайзера.

Рассмотрим ситуацию, когда необходимо произвести модернизацию уже существующей котельной. Котельная является блочно-модульной. Основное газопотребляющее оборудование – три паровых котла Viessmann (Германия) модели 200-HS. Мощность котлов согласно техническому паспорту составляет 4,12 МВт при максимально допустимом рабочем давлении 6 бар. Такая мощность рассчитана производителем при условии температуры теплоносителя в обратной магистрали порядка 2. Соответственно, фактическая мощность котлов будет меньше (температура в обратной магистрали не должна быть менее 50 во избежание сокращения срока службы оборудования). Система удаления продуктов сгорания – по трем отдельным газоходам равного диаметра, объединенных в единую дымовую трубу металлическим каркасам. Трубы выполнены из стальных цилиндрических секций. Горелки подобраны таким образом, что поставляемые с ними в комплекте вентиляторы рассчитаны лишь на преодоление аэродинамического сопротивления внутренних поверхностей котла.

Экономайзер представляет собой конструкцию, состоящую из трех одинаковых цилиндрических секций, каждая из которых имеет патрубки для подвода и отвода среды (воды). В зависимости от потребности предприятия в тепловой энергии, в работе находятся один, два или же три котла. Горелки обеспечивают режим работы каждого котла при нагрузках 60% и 100%. Для оптимизации тепловой схемы при различных вариантах работы газопотребляющего оборудования, предусмотрено уменьшение или же увеличение водяного объема экономайзера путем изменения положения дисковых затворов (2 штуки). Внутри каждой секции находятся две трубные доски, установленные перпендикулярно направлению движения продуктов сгорания. К данным трубным доскам крепятся трубки, внутри которых находятся продукты сгорания. В целях уменьшения габаритов экономайзера газовые трубки выполнены в виде змеевиков. Экономайзер врезается в уже существующие участки горизонтальных газоходов, для чего конструкцией предусматривается шесть фланцевых соединений. Каждая из трех секций является полностью дренируемой. В случае выхода из строя какой-либо из секций останавливается только тот котел, на

газоходе которого размещена неисправная секция. Далее секция дренуруется, после чего ее замену возможно осуществить менее чем за один час силами одного-двух сотрудников эксплуатирующей организации.

В связи с тем, что экономайзер создает дополнительное аэродинамическое сопротивление, должен быть заново произведен аэродинамический расчет дымовой трубы. В случае, если самотяги недостаточно (см. формулу 1), требуется предусмотреть увеличение высоты дымовой трубы за счет установки дополнительных секций или же установку тягодутьевых машин.

$$H_C = H \cdot \left(\Gamma_{\text{ВЕРТ}} \cdot \frac{273}{273 + T_E} - \Gamma_0 \right) \quad (1)$$

Исходные данные для аэродинамического расчета дымовой трубы приведены в табл. 1. Расчет производится в соответствии с Нормами аэродинамического расчета котельных агрегатов ЦКТИ.

Таблица 1.

№	Наименование показателя	Обознач.	Единица измерения	Значение
1	Суммарная мощность котельной	Q	ккал/ч	10630000
2	Расчетная температура наружного воздуха (осень)	T_E	°С	10
3	Температура отводимых газов max	T_r	°С	368
4	Температура воздуха, окружающего дымоход	$T_{\text{вв}}$	°С	10
5	Коэффициент теплопередачи стенок дымохода	$k_{\text{ст}}$	кВт/м ² °С	2,9
6	Высота трубы	H	м	35
7	Длина горизонтального участка	L	м	7
8	Скорость ветра	W_E	м/с	20
9	Коэффициент трения для газохода	λ	-	0,02
10	Аэродинамический коэффициент помещения	γ_0	-	0,025
11	КПД котельной установки	η	-	0,8303
12	Диаметр горизонтального участка	D_r	м	0,7
13	Диаметр вертикальной трубы	D_v	м	1,1
14	Коэффициент избытка воздуха горелки	α	-	1,1
15	Объемная теплоемкость дымовых газов	C_r	кВт/м ² °С	5,018
16	Низшая теплота сгорания топлива	$Q_{\text{н}}$	ккал/нм ²	8620

Примечание:

1. Все коэффициенты приняты для газоходов из новой стали без утепления.

2. Скорость ветра и температура наружного воздуха – согласно метеорологическим данным для центрального региона России в осенний период.
3. Низшая теплота сгорания топлива – согласно Нормам расчета котельных установок.
4. Суммарная мощность котельной и КПД котельной установки – согласно данным, полученным при помощи программы Boiler Designer.

Корольков Денис Алексеевич,
Национальный исследовательский институт «МЭИ»,
e-mail: rp4@modks.com

УДК 621.181.123

Р. Д. КУЗЬМИН, бакалавр техники и технологии

Национальный Исследовательский Университет
Московский Энергетический Институт
111250 Москва, ул. Красноказарменная, 17
E-mail: KyzminRoman@yandex.ru

Особенности проектирования жаротрубных водогрейных котлов

Аннотация. Произведен анализ методики проектирования, основанной на [1]. Выявлены границы применимости методики. Выявлены коэффициенты, расширяющие область применения методики, описанной в [1], для проектирования жаротрубных котлов.

Ключевые слова: жаротрубный водогрейный котел, тепловой расчет.

R.D. KYZMIN, Bachelor of Engineering and Technology

National Research University
Moscow Power Engineering Institute
11250, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 34.
E-mail: KyzminRoman@yandex.ru

Design features fire-tube boilers

Abstract. There is an analysis of design techniques based on [1]. Identified limits of applicability of the method. Identified factors that extend the field of application of the method described in [1] for the design of fire-tube boilers

Key words: fire-tube boiler, thermal design.

В настоящее время возрос спрос на малые, локальные, узкоспециализированные котельные, что в свою очередь, ведет к увеличению спроса на жаротрубные водогрейные котлы малой мощности, так как подавляющее большинство жаротрубных котлов малой мощности поставляется в сборе. То есть, уменьшается на порядок время проведения монтажных работ. В условиях сложившейся экономической ситуации и в условиях потребности в импортозамещении возникает насущ-

ная необходимость в разработке методики расчета жаротрубных котлов, подобной изложенной в [1].

Основная задача состоит в том, чтобы определить границы применимости [1] к проектированию жаротрубных водогрейных котлов. Проанализировав [1], можно прийти к выводу, что основные проблемы с применимостью методик, описанных в [1], возникают из-за габаритных и геометрических особенностей жаротрубных котлов, а так же из-за различных режимов течения газов. Расчеты показали, что в большинстве случаев, в жаротрубных котлах наблюдается ламинарный режим течения газов, а в [1] номограммы построены для турбулентного режима течения газов в конвективных поверхностях нагрева.

Так же следует обратить внимание на то, что, согласно [1], коэффициент ζ , учитывающий снижение тепловосприятости экранов при его загрязнении следует принимать 0.65 в случае сжигания природного газа. Для учета уменьшения тепловосприятости экранов промышленных водотрубных котлов этот коэффициент определен опытным путем, но как показывает визуальный осмотр жаротрубных котлов, проработавших более трех лет и сжигающих природный газ, загрязнений на жаровой трубе не выявлено. Соответственно, необходимо определять коэффициент ζ непосредственно применительно к жаротрубным водогрейным котлам.

Еще один аспект, на который следует обратить внимание, это определение потерь от наружного охлаждения q_5 . В [1] это значение обратно пропорционально паропроизводительности. Но, проведя соответствующие расчеты выявлено, что это значение применительно к жаротрубным котлам оказывается выше в несколько раз. Это, в свою очередь, ведет к неправильному определению КПД котла, и, соответственно, к неверному определению расхода топлива на котел. Проведенные расчеты показывают, что ошибка в определении КПД по методике, изложенной в [1], учитывая $\sum q_i$, составляет 0,9 – 1,2%, что при расходе природного газа на котел в 46,04 $\text{м}^3/\text{ч}$ (для опытного жаротрубного котла мощностью 500 кВт) составляет 0,42 – 0,55 $\text{м}^3/\text{ч}$. Учитывая вышеизложенные данные уже можно сделать вывод о невозможности в неизменном виде использовать [1] для проектирования водогрейных жаротрубных котлов.

Рассматривая жаротрубные котлы с реверсивной топкой, возникает вопрос о возможности моделирования тепломеханических процессов, происходящих при развороте факела горелки. Большинство существующих методик не позволяют в полной мере раскрыть сложность процессов, происходящих в топках подобных котлов, что приводит, в свою очередь, к неверному определению температуры на выходе из топки, а значит, металл трубной доски будет работать в крайне напряженных температурных условиях. Это может привести к нарушению целостности сварных соединений в трубной доске и аварии котла. В [1]

для определения температуры на выходе из топки рекомендуется использовать формулу ЦКТИ:

$$\theta = \frac{Bo^{0.6}}{M \cdot a_T + Bo^{0.6}} \quad (1)$$

где θ – Безразмерная температура на выходе из топки, Bo - число Больцмана, M – параметр горения, учитывающий характер распределения температуры по высоте топки, a_T – степень черноты топки.

При определении безразмерной температуры на выходе из топки не учитывается конвективная составляющая. Для промышленных водотрубных котлов подобная неточность допустима, во-первых, в связи с пренебрежительно малой долей конвективного теплообмена, а во-вторых с устаревшей методикой расчета, не учитывающей возможности современной вычислительной техники. Для жаротрубных котлов малой мощности пренебрежение конвективной составляющей, особенно для котлов с реверсивной топкой, ведет к увеличению ошибки расчета и, вследствие этого, к увеличению возможности аварии котла.

Для расчета конвективной поверхности нагрева (дымогарных труб) применима формула:

$$Q = k \cdot \Delta t \cdot N \quad (2)$$

где Q – тепловосприятие поверхности нагрева ккал/ч, k – коэффициент теплопередачи, ккал/(м²·ч·°C), Δt – средне-логарифмический температурный напор, °C, N – поверхность теплообмена, м².

Формула (2) дает возможность с удовлетворительной точностью определить необходимую поверхность теплообмена. Коэффициент теплопередачи принимается по номограммам в [1] без внесения корректировок в том случае, если на дымогарных трубах котла установлены турбулизаторы потока. Режим течения газов становится квазитурбулентным, и применение формулы (2) становится возможным. Для случаев, когда установка турбулизаторов проектом не предусмотрена, применение номограммных значений коэффициентов теплоотдачи недопустимо без соответствующих корректировок.

Также следует обратить внимание на недопустимость закипания жидкости в водогрейном жаротрубном котле. Большинство модульных и блочно-модульных котельных, в составе которых применяются жаротрубные водогрейные котлы, не оснащаются деаэрирующими установками и установками, обеспечивающими высокую степень умягчения питательной воды. В случае даже локального закипания жидкости это приводит к резкому увеличению загрязнения наружной стенки дымогарных труб и повышению кислородной коррозии металла. В частности, на некоторых зарубежных котлах наблюдается тенденция к увеличению рабочего давления, при неизменной температуре теплоносителя на

выходе из котла. При использовании температурного графика 115/70°C и давлении 0,6 МПа недогрев котловой воды до линии насыщения составляет 8,4 ккал/кг, а в случае работы котла под более высоким избыточным давлением 0,8 МПа уже 20,4 ккал/кг. Увеличение рабочего давления котла приводит к увеличению толщины стенки корпуса котла, и к общему увеличению металлоёмкости.

Подводя итог, следует отметить, что при использовании номограммных значений из [1] применительно к проектированию жаротрубных котлов следует вводить поправочные коэффициенты, полученные опытным путем и признать ограниченность возможности применения данной методики к расчету жаротрубных водогрейных котлов. Так же следует обратить внимание на необходимость существенного умягчения питательной воды котла, а так же необходимость получения экспериментальных данных по работе различных жаротрубных котлов для построения зависимостей коэффициентов теплоотдачи от газовой стороны к стенке трубы и от стенки трубы к теплоносителю.

Литература

1. **Тепловой** расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / Под ред. Кузнецова и др. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

Кузьмин Роман Дмитриевич,
Национальный исследовательский институт «МЭИ»,
e-mail: KuzminRoman@yandex.ru

УДК 620.9

О.Н. МАХОВ, к.т.н., доцент
Е.В. МАЛЫШЕВ, студент

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

Расчет режимов работы тепловых схем водогрейных котельных

Аннотация. Сложность расчета режима работы тепловых схем современных котельных установок с паровыми, водогрейными пароводогрейными котлами вынуждает вести их расчет методом последовательных приближений. Для каждого из элементов тепловой схемы составляется уравнение теплового и материального баланса, решение которого позволяет определить неизвестные расходы и энтальпии. В связи с этим актуальным является создание программы расчета позволяющей автоматизировать процесс расчета тепловой схемы с возможностью внесения корректировок в сам расчет.

Ключевые слова: режим работы, котельная, программа расчета.

O. N. MAKHOV, Candidate of Engineering, docent,
E. V. MALYSHEV, student

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

Calculation of modes of thermal schemes hot water boiler

Abstract. The complexity of calculating the mode of operation of thermal schemes of modern boiler plants with steam, hot water steam boilers compels their calculation by the method of successive approximations. For each element of the thermal circuit is composed of the heat equation and material balance, the solution of which allows to identify the unknown costs and enthalpy. In this regard, relevant is the creation of the program of calculation allowing to automate the process of calculating the thermal circuit with the possibility of making adjustments in the calculation itself.

Key words: mode, boiler room, the calculation program.

В дипломном проектировании одним из обязательных конструкторских документов является тепловая схема. Тепловая схема представляет собой условное графическое изображение основного и вспомогательного оборудования, объединяемого линиями трубопроводов для рабочего тела. Различают принципиальную, развернутую и рабочую или монтажную тепловые схемы.

Принципиальная схема котельной предполагает указание условно лишь главного оборудования (котлоагрегаты, подогреватели, деаэраторы, насосы) и трубопроводов, не размещая арматуры, вспомогательных устройств и второстепенных трубопроводов и не уточняя количества и расположения оборудования. Развернутая тепловая схема содержит все количество устанавливаемого оборудования, а также все коммуникации – трубопроводы, соединяющие оборудование с помещаемой на них запорной и регулирующей арматурой. Так как объединение в развернутой тепловой схеме всех элементов и оборудования котельной из-за их большого числа затруднительно, эту схему разделяют на части по технологическому процессу. Рабочая или монтажная схема котельной выполняется в ортогональном, а отдельные сложные узлы в аксонометрическом изображении с указанием отметок расположения трубопроводов, их наклона, арматуры, креплений, размеров и т.д.

Схема котельной выполняется без соблюдения масштаба. Действительное пространственное расположение составных частей установки не учитывают. Для пояснения каких-либо особенностей схема котельной может включать дополнительные к установленным стандартам сведения и поясняющие надписи, не шифруя их. Для изображения на схемах различных элементов и устройств применяют условные графические обозначения, установленные стандартами. Все размеры условных графических изображений, указанные в стандартах допускается пропорционально изменять. Для того чтобы тепловые

схемы котельных, использующих водогрейные котлы, легко читались, рекомендуется следующий порядок изображения оборудования на них. На верхней правой части листа размещают водогрейные котлы, а на левой – деаэраторы, ниже котлоагрегатов размещают рециркуляционные и еще ниже сетевые насосы, а под деаэраторами – теплообменники (подогреватели), баки деаэрированной и рабочей воды, подпиточные насосы, насосы сырой воды, дренажные баки и продувочный колодец.

Для обеспечения заданной из условий предупреждения коррозии температуры воды перед котлом в трубопровод за сетевым насосом подают при помощи рециркуляционного насоса необходимое количество горячей воды, вышедшей из водогрейного котла. Линию, по которой подают горячую воду, называют рециркуляционной. При всех режимах работы тепловой сети, кроме максимально-зимнего, часть воды из обратной линии после сетевого насоса, минуя котел, подают по перепускной линии в подающую магистраль, где она, смешавшись с горячей водой из котла, обеспечивает заданную расчетную температуру в подающей магистрали тепловых сетей. Вода, предназначенная для восполнения утечек в тепловых сетях, предварительно подается насосом сырой воды в подогреватель сырой воды, где она подогревается до температуры 18–20 °С и затем направляется на химводоочистку. Химически очищенная вода подогревается в теплообменниках и деаэрируется в деаэраторе. Воду для подпитки тепловых сетей из бака деаэрированной воды забирает подпиточный насос и подает в обратную линию. В котельных, использующих в работе водогрейные котлы, часто устанавливают вакуумные деаэраторы. Но они требуют при эксплуатации тщательного надзора, поэтому предпочитают устанавливать деаэраторы атмосферного типа.

Сильное влияние на оборудование котельной, в которой размещаются водогрейные котлы, оказывает система горячего водоснабжения – закрытая или открытая. Открытой называется система, в которой теплоноситель – горячая вода – частично или полностью используется потребителем. В закрытых системах нагрев воды на горячее водоснабжение осуществляется прямой отопительной водой в местных теплообменниках.

По своему назначению котельные малой и средней мощности делятся на следующие группы: отопительные, предназначенные для теплоснабжения систем отопления, вентиляции, горячего водоснабжения жилых, общественных и других зданий; производственные, обеспечивающие паром и горячей водой технологические процессы промышленных предприятий; производственно-отопительные, обеспечивающие паром и горячей водой различных потребителей. В зависимости от вида вырабатываемого теплоносителя котельные делятся на водогрейные, паровые и пароводогрейные. У каждого такого источника своя тепловая схема со своими особенностями.

Сама тепловая схема и режим работы котельной зависит от вида вырабатываемого теплоносителя и от схемы тепловых сетей, связывающих котельную с потребителями пара или горячей воды, от качества исходной воды. Водяные тепловые сети бывают двух типов: закрытые и открытые. При закрытой системе вода (или пар) отдает свою теплоту в местных системах и полностью возвращается в котельную. При открытой системе вода (или пар) частично, а в редких случаях полностью отбирается в местных установках.

Сам расчет начинается с определения или задания тепловых нагрузок, расхода пара и горячей воды. Далее производится выбор типа, количества и производительности котельных агрегатов. В некоторых случаях оказывается целесообразным принять два типа котла ряд технико-экономических расчетов по применению в котельных паровых и водогрейных котлов и рекомендует в котельных с общей теплопроизводительностью (пар и горячая вода) до 50 Гкал/ч устанавливать только один тип котлов - паровые котлы, а горячую воду для нужд отопления, вентиляции и горячего водоснабжения получать от пароводяных подогревателей. Для мощных котельных с общей теплопроизводительностью свыше 100 Гкал/ч может оказаться рациональным применение комбинированных паровых котлов с гибкой регулировкой паровой и водогрейной нагрузок.

После выбора котлов, производится выбор всего необходимого для их работы вспомогательного оборудования, т. е. различных теплообменных аппаратов, аппаратуры водоподготовки, насосов, баков и пр.

Достаточно большая сложность тепловых схем современных котельных установок с паровыми, водогрейными пароводогрейными котлами вынуждает вести их расчет методом последовательных приближений. Для каждого из элементов тепловой схемы составляется уравнение теплового и материального баланса, решение которого позволяет определить неизвестные расходы и энтальпии. Все эти расчеты целесообразно производить в специализированных математических программах. Однако использование таких программ связано с определенными трудностями. Изучение синтаксиса встроенного языка, покупка лицензии на использование программы и т.п.. Поэтому все расчеты связанные с расчетом самой схемы, решением уравнений, итерационными процедурами можно выполнять в офисном приложении MS Excel, которое есть на каждом рабочем месте. Эта программа хороша, тем, что в ней можно смоделировать любой фактический режим работы любой котельной или ТЭЦ, а также решить любое уравнение или получить необходимую зависимость. Плюсом программы является ещё и то, что студенты могут самостоятельно скорректировать программу на свое усмотрение, а также внести свои корректировки в расчет и в интерфейс программы. Все это развивает индивидуальное творчество и мышление, а также позволяет студенту отследить порядок расчета, что в закрытых программах отсутствует.

Махов Олег Николаевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: makhoviv@yandex.ru

Малышев Евгений

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: alter-nick@inbox.ru

УДК 621.1

А.В. МАРТЫНОВ, к.т.н., доцент,
В.В. ЛОГИНОВ

Национальный исследовательский университет
Московский энергетический институт
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная 14
E-mail: victorr183@rambler.ru

Повышение эффективности ТЭЦ при низкотемпературном теплоснабжении

Аннотация. Представляются общие обоснования преимуществ отбора с турбин тепла более низкого потенциала при комбинированной выработке тепла и электричества на ТЭЦ. Приведены графические зависимости, отражающие улучшение показателей эффективности паротурбинной установки при уменьшении температуры отборов пара.

Ключевые слова: ТЭЦ, низкотемпературное теплоснабжение, работоспособность.

Increase in efficiency of CHP at the low-temperature heating supply

Abstract. Represents the common base benefits the selection of a lower heat capacity at combined generation of heat and electricity in CHP. In article shows a graph reflecting the improvement in the efficiency of steam turbine with decreasing temperature steam extraction.

Key words: CHP, low-temperature heating supply, efficiency

Эффективность паротурбинной установки можно оценить двумя критериями:

- 1) Коэффициентом полезного действия (КПД)
- 2) Целевым коэффициентом, учитывающим совершенную работу (L) и тепло отборов ($Q_{от}$).

Целевой коэффициент на основе энергетического баланса учитывает количество полученной энергии (L и $Q_{от}$), отнесенные к затраченной энергии, подведенной с паром к турбине (Q_T). Повышение значения целевого коэффициента указывает на увеличение эффективности ТЭЦ.

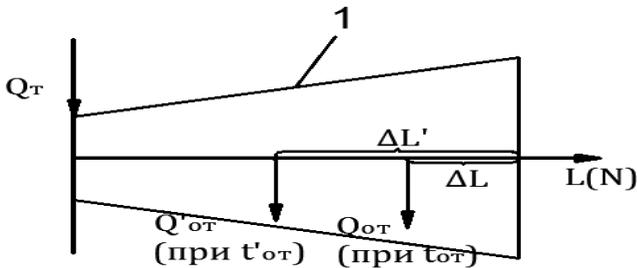


Рис. 1. Зависимость работы, совершаемой турбиной от подводимой теплоты при разных значениях теплоты отбираемого пара.

1-Турбина; ΔL -недовыработка турбины при низком значении отбираемого тепла; $\Delta L'$ -недовыработка турбины при высоких значениях отбираемого тепла; $Q_{от}$ -тепло, отбираемое на нужды теплофикации

При наличии отборов в турбине происходит недовыработка электрической энергии, которая оценивается в ΔL . Чем выше теплота отбора ($Q_{от}$), тем больше недовыработка ΔL . Так при отборе $Q_{от}$ недовыработка составляет ΔL . Если отбор имеет более высокую теплоту $Q'_{от}$, то недовыработка составит большую величину $\Delta L'$ ($\Delta L' > \Delta L$). Таким образом, очевидно что при отборе с более низким $Q_{от}$ работа турбины увеличится, а соответственно увеличится выработка более дорогой электрической энергии.

Так как отбор тепла $Q_{от}$ может происходить при различных температурах ($t_{от}$), то работоспособность одного и того же количества тепла при различных температурах будет иметь различные значения. Так при температуре $t_{от}$ недовыработка работы составляет ΔL , а при $t'_{от}$ недовыработка будет $\Delta L'$, т.е с ростом температуры отбора с $t_{от}$ до $t'_{от}$, величина недовыработки изменится с ΔL до $\Delta L'$.

Если принять, что тепло вырабатывается при $t_{от}=60$ °C то недовыработка работы ΔL (1) составит:

$$\Delta L = Q_{от} \cdot \tau_q \cdot \eta_T \quad (1);$$

где $Q_{от}$ -отбираемое тепло, τ_q - коэффициент работоспособности тепла (2), η_T -коэффициент полезного действия турбины

$$\tau_q = \frac{T_{от} - T_{ос}}{T_{от}} = \frac{333 - 293}{333} = 0,12 \quad (2);$$

$T_{от}$ – температура отбора, $T_{ос}$ – температура окружающей среды

Если тепло отбирается при других температурах ($t_{от}=70, 80\dots^{\circ}\text{C}$), то соответственно будет меняться коэффициент работоспособности тепла τ_q (рис. 2).

С увеличением температуры отбора $t_{от}$ происходит рост коэффициента работоспособности τ_q , что приводит к увеличению недовыработки работы ΔL .

Одним из способов снижения температуры отбора и расхода греющего пара является уменьшение разницы температур между транспортируемым теплоносителем и окружающей средой, что приводит к снижению потерь тепла при транспортировке.

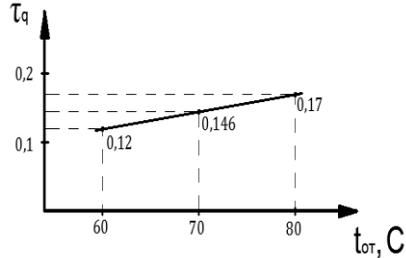


Рис. 2. Изменение коэффициента работоспособности T_q .

Проект, реализованный в городе Листрупе (Listrup) в Дании доказал, что возможно выполнять водяное отопление зданий теплоносителем с температурой ниже 50°C , а горячее водоснабжение возможно с температурой 47°C , т.е. лишь на 3°C ниже температуры первичного контура [1]. В связи с различием климатических условий России и Дании перейти на такие параметры не представляется возможным, но сама идея низкотемпературного теплоснабжения может рассматриваться в качестве альтернативной в сетях централизованного теплоснабжения нового поколения.

Основной проблемой на пути внедрения систем, использующих низкопотенциальное тепло, является неудовлетворительный с точки зрения энергоэффективности жилой фонд, поэтому развитие таких систем должно происходить совместно с увеличением доли энергооберегающих зданий. Также для полноценной работоспособности необходимы адаптированные отопительные приборы, повышение эффективности транспортировки тепла, новые сетевые трубы и новые конструкции ЦТП и ИТП для работы в низкотемпературных теплосетях.

Таким образом, низкотемпературное теплоснабжение одновременно повышает эффективность работы ТЭЦ и тепловых сетей, следовательно имеет смысл переходить на низкотемпературное теплоснабжение, если оно удовлетворяет потребителей.

Литература

1. Скривер Г. Энергоэффективное низкотемпературное теплоснабжение. // Журнал «Энергосбережение». 2012. №6. С. 54-58.
2. Рыженков В.А., Мартынов В.А., Хитрова Н. В., Кутько Н.Е. Экологически чистая система тепло-электроснабжения поселка // IV школа-семинар «Энергосбережение» МЭИ, 2008. Стр. 293-295.

Логонов Виктор Валерьевич,

ФГБОУ ВПО Национальный Исследовательский Университет «Московский Энергетический Институт». E-mail: victorr183@rambler.ru

Мартынов Аркадий Владимирович,

ФГБОУ ВПО Национальный Исследовательский Университет «Московский Энергетический Институт» e-mail: pmatalie@yandex.ru

УДК 621.1:541.11.001.57

С.К. ПОПОВ, д.т.н., профессор
И.Н. СВИСТУНОВ, аспирант

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
111250 г. Москва, ул. Красноказарменная д.14
E-mail: *ilya.svistunov@gmail.com*

Моделирование кинетики процесса термохимической регенерации теплоты отходящих газов

Аннотация. Одним из видов энергетических мероприятий является термохимическая регенерация теплоты газовых отходов. В данной работе исследована кинетическая модель паровой конверсии, основанная на работах Хью-Фроменга. Авторами получены данные об изменении состава получаемого синтез-газа по длине реакционного элемента в зависимости от количества пара, расходуемого на конверсию и температуры синтез-газа.

Ключевые слова: высокотемпературные теплотехнологические установки, термохимическая регенерация, энергосбережение, паровая конверсия природного газа.

Modeling of the kinetics of the process of thermochemical heat recovery of exhaust gases

Abstract. This paper takes up the notion of the developments of high-temperature process installations with thermochemical recuperation (TCR) of heat waste gas on the basis of steam reforming of the natural gas. A kinetic model of the steam reforming of natural gas based on the paper of J. Xu, G. and F. Froment was researched at this paper. This research showed how composition of the synthesis gas depend from temperature of the synthesis gas and an amount of the steam.

Keywords: high-temperature process installation, thermochemical recuperation, energy saving, steam reforming of natural gas.

Термохимическая регенерация (ТХР) теплоты отходящих газов является одним из перспективных энергосберегающих мероприятий для высокотемпературных установок, отапливаемых природным газом [1– 10]. Паровая конверсия природного газа как основной процесс ТХР может быть реализована в радиационном теплообменнике, поверхность теплообмена которого состоит из трубчатых реакционных элементов, заполненных катализатором.

Одной из наиболее распространенных и признанных является кинетическая модель Хью-Фроменга – модель процесса каталитической паровой конверсии метана [9], основу которой составляют эксперименты, проведенные на катализаторе $\text{Ni/MgAl}_2\text{O}_4$. Эта модель использована рядом исследователей [10 – 13].

Согласно [9], метан и пар адсорбируются на катализаторе с диссоциацией, а поверхностные реакции получения CO и CO_2 являются лимитирующими этапами в процессе конверсии.

Используя приведенные в [9] параметры для скоростей химических реакций и скоростей адсорбции на катализаторе, в среде Mathcad реализована математическая модель кинетики паровой конверсии в трубчатом реакционном элементе, заполненном никелевым катализатором [2, 10].

Модель позволяет, в частности, исследовать изменение состава реагирующей парогазовой смеси по длине реакционного элемента при заданных конструктивных и режимных параметрах элемента. Результаты расчета, представленные на рис. 1, получены при температуре парогазовой смеси $T = 900$ °С, удельном расходе пара $V_{\text{пар}} = 2,0$ м³ пара/(м³ метана), давлении смеси и получаемого синтез-газа 0,15 МПа, длине реакционного элемента 3 м.

Из анализа полученных данных следует, что состав синтез-газа, близкий к равновесному, устанавливается при заданных условиях на начальном участке $L_{\text{нач}} = 1,2$ м от входа смеси в реакционный элемент. Зависимость $L_{\text{нач}}$ от температуры T при различных значениях

$V_{\text{пар}}$ показана на рис. 2.

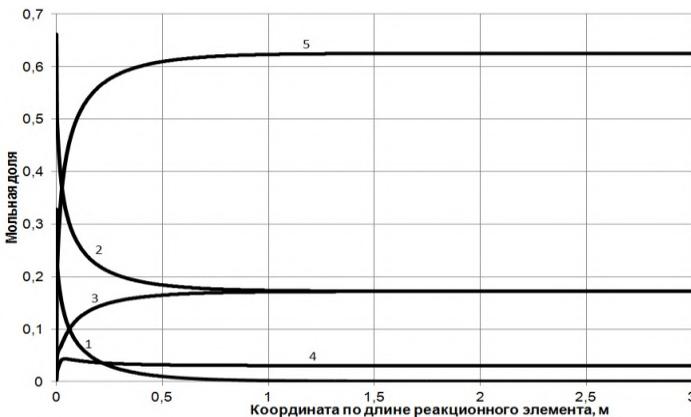


Рис. 1. Изменение мольной доли компонентов синтез-газа по длине

реакционного элемента: 1 – CH₄; 2 – H₂O; 3 – CO; 4 – CO₂; 5 – H₂

Авторами создана химико-математическая модель процесса паровой конверсии метана в программном комплексе Aspen Plus, который содержит современные представления о кинетике химических реакций, идущих с участием катализатора. Данные, полученные посредством Mathcad-модели Хью-Фроента и Aspen-модели, существенно различаются на начальном участке реакционного элемента: Mathcad-модель дает более высокую скорость изменения состава синтез-газа. Полученный результат следует учесть при детальном исследовании тепловой работы реакционного элемента.

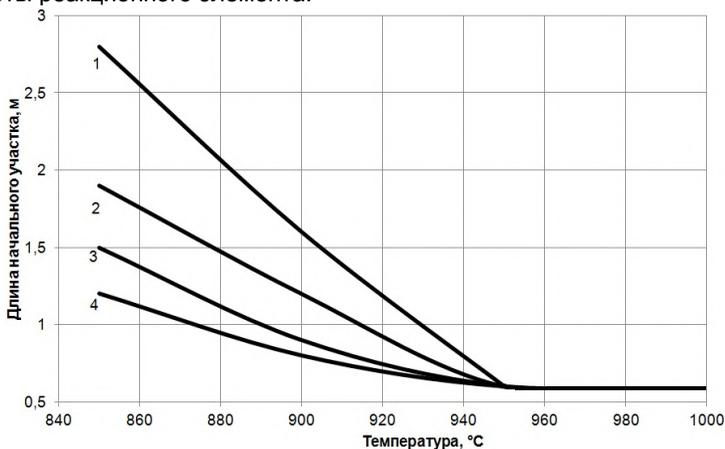


Рис. 2. Зависимость $L_{нач}$ от температуры парагазовой смеси и удельного расхода пара: 1 – $V_{пар} = 1,7$; 2 – $V_{пар} = 2,0$; 3 – $V_{пар} = 2,5$; 4 – $V_{пар} = 3,0$

Литература

1. Шопшин М.Ф., Новосельцев В.Н., Тюрин А.И. и др. Химическая регенерация тепловых отходов топливных печей. Сер. «Энерготехнологические процессы в химической промышленности». М.: НИИТЭХИМ, 1981.
2. Крылов А.Н. Повышение эффективности стекловаренных печей на основе комплексной регенерации тепловых отходов: Автореф. дис. на соиск. учен. степени кандидата техн. наук. М., 2007.
3. Рестрепо Г.А. Повышение энергетической эффективности высокотемпературных установок посредством термохимической рекуперации тепловых отходов: Автореф. дис. на соиск. учен. степени кандидата техн. наук. М., 2011.
4. Попов С.К. Анализ предельного уровня энергосбережения в установках с термохимической регенерацией теплоты. – Вестник МЭИ, 2012, № 5. – С. 9–13.
5. Попов С.К., Свиштунов И.Н. Исследование установок с термохимической регенерацией теплоты на основе пароуглекислотной конверсии. – Промышленная энергетика, 2013, № 8. – С. 28–31.

6. **Попов С.К.**, Свистунов И.Н., Конопелько Е.Д. Анализ эффективности термохимической регенерации в высокотемпературных установках. – Энергосбережение и водоподготовка, 2014, №3. – С. 52–56.
7. **Попов С.К.**, Свистунов И.Н., Ипполитов В.А. Разработка энергосберегающих тепловых схем промышленных печей и совершенствование методов их исследования // Энергосбережение – теория и практика: Труды Седьмой международной школы-семинара молодых ученых и специалистов (2014 г., Москва). – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – С. 126–129.
8. **Попов С.К.**, Свистунов И.Н., Ипполитов В.А. Энергосбережение при утилизации тепловых отходов промышленных печей на основе конверсии природного газа. – Тепловые процессы в технике, 2015, т. 7, № 2. – С. 80–86.
9. **J. Xu**, G. F. Froment. Methane Steam Reforming, Methanation and Water-Gas Shift: 1. Intrinsic Kinetics // *AIChE Journal*. – 1989. – V. 35(1). – P. 88–95.
10. **Крылов А.Н.**, Попов С.К., Сергиевский Э.Д. Моделирование процессов теплообмена при термохимической регенерации теплоты отходящих газов. – Вестник МЭИ, 2008, №4. С.49–54.
11. **Zhongxiang Chen**, Pradeep Prasad, Yibin Yan, Said Elnashaie. Simulation for steam reforming of natural gas with oxygen input in a novel membrane reformer. // *Fuel Processing Technology*, - 2002. – V. 83 (2003). – P. 235–252.
12. **Kayvan Khorsand**, Mehdi A. Marvast, Narges Pooladian, Madjid Kakavand. Modeling and simulation of methanation catalytic reactor in ammonia unit. // *Petroleum & Coal*, - 2007. – V. 49(1). – P. 46–53.
13. **D. L. Hoang**, S. H. Chan, O. L. Ding. Kinetic and modeling study of methane steam reforming over sulfide nickel catalyst on a gamma alumina support // *Chemical Engineering Journal*. – 2005. – V. 112. – P. 1–11.

УДК 621.181.27

Р.И. САЙФУТДИНОВ, бакалавр техники и технологии

Национальный исследовательский университет
Московский энергетический институт
111250 Москва, ул. Красноказарменная, 17
E-mail: pro16@modks.com

Разработка водогрейного котла-утилизатора мощностью 0,3 МВт, работающего на уходящих газах ГПГУ

Аннотация. Рассмотрены варианты котлов-утилизаторов водогрейных: водотрубный, газотрубный и газотрубный с турбулизатором потока уходящих газов [1]. При помощи программного комплекса Flowvision были получены картины течения уходящих газов и теплоносителя, смоделированы поля распределения температур. Было принято решение о дальнейшей разработке газотрубного котла-утилизатора водогрейного с турбулизатором потока уходящих газов

Ключевые слова: котел-утилизатор водогрейный, тепловой расчет.

R.I. SAYFUTDINOV, Bachelor of Engineering and Technology

National Research University
Moscow Power Engineering Institute
11250, Moscow, Krasnokazarmennaya St., 17. E-mail: pro16@modks.com

Development of the 0,3 MW water-heating copper utilizer working at the leaving GPGU gases.

Abstract. Options of coppers utilizers water-heating are considered: water pipes-ny, gas-pipe and gas-pipe with a turbulizer of a stream of the leaving gases [1]. By means of the program Flowvision complex pictures of a current of the leaving gases and the heat carrier were received, fields of distribution of temperatures are simulated. The decision on further development of a gas-pipe copper utilizer of a stream, water-heating with a turbulizer, of the leaving gases was made

Key words: copper utilizer water-heating, thermal calculation.

Уходящие газы газопоршневых генераторных установок (ГПГУ) имеют температуру 450-460 °С. Учитывая высокую температуру уходящих газов, целесообразно их использование в качестве греющей среды в водогрейном котле-утилизаторе (КУВ). Данное решение позволяет использовать связку ГПГУ и КУВ в качестве локальной системы производства электрической и тепловой энергии, поддерживая температурный режим отопительной магистрали за счет котла-утилизатора, отказаться от использования дорогостоящих отдельно-стоящих водогрейных котлов.

Целью работы являлась разработка мобильного водогрейного котла-утилизатора (КУВ) мощностью 0,3 МВт, работающего на уходящих газах ГПГУ с двигателем MWM TCG 2016 V16C, для поддержания температурного режима индивидуального теплового пункта (ИТП) с температурным графиком 95-70°С (рис. 1). Дополнительные требования проектирования КУВ: мобильность (габариты КУВ должны позволять установку его в один климатический контейнер с ГПГУ), аэродинамическое сопротивление КУВ не должно стать причиной установки дополнительного вспомогательного оборудования в газовом тракте, простота и надежность конструкции.

В рамках работы были рассмотрены следующие варианты: водотрубный КУВ, газотрубный КУВ и газотрубный КУВ с турбулизатором потока уходящих газов [1]. Основной трудностью разработки газотрубного КУВ является то, что отсутствует методика расчета газотрубных КУВ малой мощности. Несмотря на эти сложности, были проведены соответствующие конструкторские расчеты с последующим моделированием при помощи программного комплекса Flowvision. Были получены картины течения уходящих газов и теплоносителя в КУВ, смоделированы поля распределения температур и на основе анализа результа-

тов моделирования внесены соответствующие изменения в конструкцию КУВ. Результаты этих расчетов приведены в сводной табл. 1.

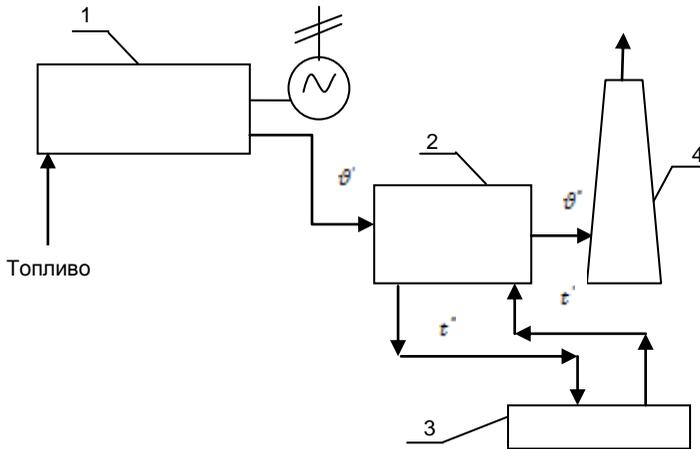


Рис. 1. Принципиальная схема ТЭЦ в составе: ГПГУ и КУ: 1 – газопрошневая генераторная установка (ГПГУ), 2 – котел-утилизатор (КУ), 3 – индивидуальный тепловой пункт (ИТП), 4 – дымовая труба (ДТ); $\vartheta' = 455^{\circ}\text{C}$, $\vartheta'' = 120^{\circ}\text{C}$, $t' = 70^{\circ}\text{C}$, $t'' = 95^{\circ}\text{C}$.

Таблица 1

Наименование параметра	Единица измерения	Водотрубный КУВ	Газотрубный КУВ	Газотрубный КУВ с турбулизаторами потока
Длина	мм	3075	2690	2360
Ширина	мм	500	1070	1010
Высота	мм	4020	1070	1010
Сортамент труб	мм	50x3	32x3	32x3
Число труб	шт	40	146	130
Аэродинамическое сопротивление	Па	1038	518,397	594,607
Степень газоплотности	-	Низкая	Высокая	Высокая
Простота изготовления	-	Нет	Да	Да
Простота обслуживания	-	Нет	Да	Да
Коэффициент тепловой эффективности	-	0,9	0,85	≈0,99

Таблица 2

№	Наименование параметра		Единица измерения	Величина
	1	2		
	Температура газов на входе в КУВ		°С	455
	Температура газов на выходе из КУВ		°С	120
	Температура воды в прямой магистрали КУВ		°С	95
	Температура воды в обратной магистрали КУВ		°С	70
	Давление воды в прямой магистрали КУВ		кгс/см ²	5
	Давление воды в обратной магистрали КУВ		кгс/см ²	3

Было принято решение о дальнейшей разработке газотрубного КУВ с турбулизатором потока уходящих газов. Основные расчетные показатели при работе газотрубного КУВ с турбулизаторами потока приведены в табл. 2. Данный КУВ обладает низким аэродинамическим и гидравлическим сопротивлением, высоким коэффициентом тепловой эффективности и коэффициентом сохранения тепла, высокой степенью газоплотности, прост в изготовлении и эксплуатации, имеет сравнительно небольшие габаритные размеры, что позволяет размещать его в одном климатическом контейнере с ГПГУ,

Литература

1. **Котлы-утилизаторы** и энерго-технологические агрегаты / Под ред. Л.Н. Сидельковского. – М.: ЭнергоАтомиздат, 1989. – 273 с.

УДК 697.9

И.М. ОКАТОВ, студент, М.С. ЩЕРБАКОВ, студент,
В.В. СЕННИКОВ, к.т.н., доцент, А.В. КОНОВАЛОВ, к.т.н., доцент

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

Влияние тепловой нагрузки на температуру сетевой воды после подогревателей горячего водоснабжения различных типов

Аннотация. Доказано, что при использовании пластинчатых теплообменников в системе горячего водоснабжения, количество тепловой нагрузки влияет на температуру обратной воды в отличие от метода, используемого для расчета кожухотрубных теплообменных аппаратов.

Ключевые слова: теплообменные аппараты, горячее водоснабжение, тепловая нагрузка.

I.M. OKATOV, stud., M.S. SHCHERBAKOV, stud.,
V.V. SENNIKOV, Candidate of Engineering, docent,
A. V. KONOVALOV, Candidate of Engineering, docent

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

The influence of thermal load on the temperature of the water after the hot water heaters hot water supply of various types

Abstract. Proved that with the use of plate heat exchangers in hot water system, the amount of thermal load influences the temperature of return water as opposed to the method used to calculate the shell and tube heat exchangers.

Key words: heat exchanger, hot water supply, heat load.

В системах горячего водоснабжения широко используются кожухотрубчатые теплообменники, которые в настоящее время заменяются на пластинчатые.

В течение суток нагрузка горячего водоснабжения меняется в диапазоне от минимальной до максимальной.

Тепловая производительность теплообменного аппарата определяется согласно [1] по формулам:

$$Q = \varepsilon W_M \nabla, \quad (1)$$

А безразмерная тепловая нагрузка, при условии представления среднелогарифмической разности температур в виде линейной зависимости:

$$\varepsilon = \frac{1}{0,35 \frac{W_M}{W_B} + 0,65 + \frac{1}{\Phi} \sqrt{\frac{W_M}{W_B}}}, \quad (2)$$

Тепловая нагрузка теплообменников, выражается через водяные эквиваленты:

$$Q = W_M(t_1 - t_2) = W_B(t_\Gamma - t_X), \quad (3)$$

Величины, входящие в формулы (1-3), приняты в соответствии с [1].

Подставив в (1) выражения (2) и (3) и сократив на Q в обеих частях уравнения получим:

$$1 = \frac{1}{0,35 \cdot \frac{t_\Gamma - t_X}{t_1 - t_2} + 0,65 + \frac{1}{\Phi} \sqrt{\frac{t_\Gamma - t_X}{t_1 - t_2}}} \cdot \frac{t_\Gamma - t_X}{t_1 - t_2}, \quad (4)$$

Уравнение (4) позволяет определить значение температуры горячей воды на выходе из теплообменника t_Γ без учета влияния тепловой нагрузки. Таким образом, величина тепловой нагрузки при работе

кожухотрубчатых теплообменников не оказывает влияние на температуры нагреваемой воды. На рис. 1 представлен график температуры сетевой воды после кожухотрубчатого подогревателя при различных нагрузках горячего водоснабжения (максимальной, средней и минимальной)

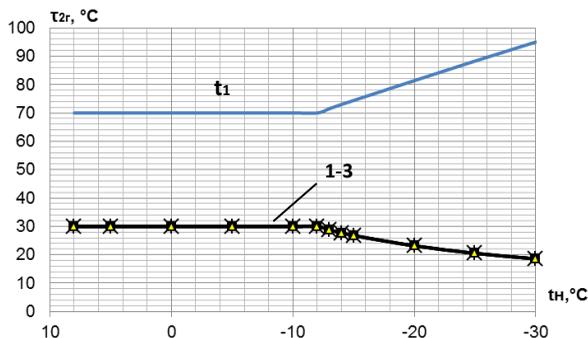


Рис. 1. Графики температуры воды после кожухотрубчатого подогревателя системы горячего водоснабжения, при максимальной, средней и минимальной расчетных нагрузках:

t_1 – температура сетевой воды в подающем трубопроводе; 1-3 – температура сетевой воды после подогревателя при максимальной, средней и минимальной расчетных нагрузках

Таблица 1. Исходные данные для расчета пластинчатого теплообменника

Вид тепловой нагрузки	ГВС		
	Тепловая мощность, Гкал/ч	Q_{\min} 0,0137	$Q_{\text{ср}}$ 0,055
Тип теплообменника	Разборный		
Схема выполнения	параллельная		
Коэффициент часовой неравномерности нагрузки ГВС	$\chi_{\text{ч}}=2,4$		
Греющий контур			
Температура на входе (излом), °C	70		
Температура на выходе (излом), °C	30		
Допустимые потери напора, кПа	50		
Рабочая температура, °C	110		
Рабочее давление, бар	13,7		
Допустимые потери напора, кПа	50		
Нагреваемый контур			
Температура на входе, °C	5		
Температура на выходе, °C	60		

Методика работы пластинчатых теплообменных аппаратов использует специальную компьютерную программу [2]. Расчеты по данной программе свидетельствуют о том, что для пластинчатых теплообмен-

ных аппаратов применение методики [1] недопустимо в виду ее большой погрешности.

На рис. 2 и 3 представлены расчеты пластинчатого теплообменника при различных нагрузках горячего водоснабжения.

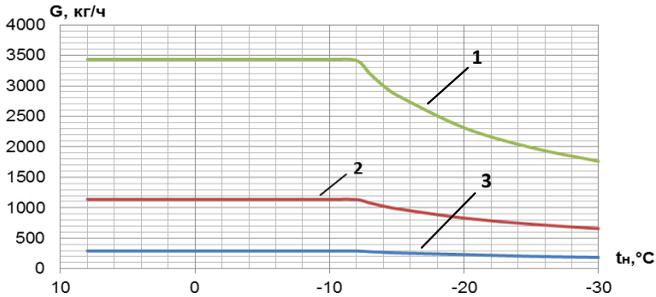


Рис. 2. График расходов сетевой воды на пластинчатый подогреватель системы горячего водоснабжения для разных нагрузок:

1, 2, 3 – массовый расход сетевой воды при максимальной, средней и минимальной расчетных нагрузках ГВС, соответственно.

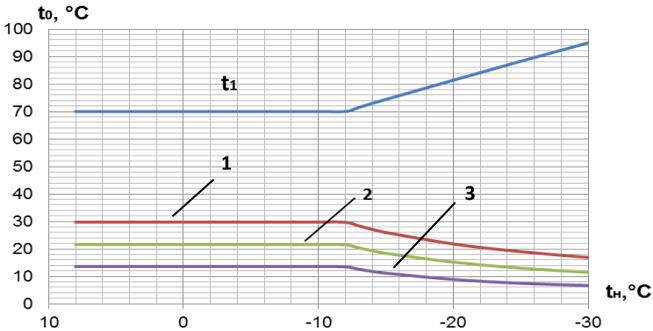


Рис. 3. График изменения температуры сетевой воды на выходе из пластинчатого теплообменника горячего водоснабжения при различных тепловых нагрузках:

t_1 – температура сетевой воды в подающем трубопроводе; 1-3 – температура сетевой воды после подогревателя при максимальной, средней и минимальной расчетных нагрузках

По характеру изменения расхода воды в сети отопительный период можно разделить на два диапазона: первый – с постоянной температурой воды в подающей линии сети, второй – с переменной температурой воды.

При постоянной нагрузке горячего водоснабжения расход сетевой воды в первом диапазоне должен оставаться постоянным. Во втором диапазоне должно осуществляться местное количественное регулирование. При повышении температуры в подающем трубопроводе тепловой сети, регулятор температуры уменьшает расход греющей воды через водяной подогреватель, что замедляет рост температуры греющей воды. В результате тепловая нагрузка подогревателя сохраняется постоянной, а температура обратной сетевой воды после подогревателя снижается. Причем значение температуры обратной сетевой воды зависит от тепловой нагрузки пластинчатого теплообменника.

Литература

1. **Соколов Е. Я.** Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов.–5-е изд. перераб.– М.:Энергоиздат, 1998. 360с., ил.
2. **Сенников В. В.** Расчет пластинчатого теплообменника на ЭВМ

Коновалов Анатолий Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: nelli@pte.ispu.ru

Окатов Илья Михайлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: il.okatoff@yandex.ru

Щербаков Максим Сергеевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: maxon_scherbakov_94@mail.ru

Сенников Владимир Васильевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kbispu@mail.ru

СЕКЦИЯ «ТЕПЛОБМЕН В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ»

УДК 620.93

О.И. ГОРИНОВ, к.т.н., доцент, В.Ф. НИКИШОВ, к.т.н., доцент

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

Технологическая схема автономного энергообеспечения на основе блок-модульного термического реактора

Аннотация. Рассмотрен передвижной термический реактор для получения газообразного топлива из бытовых отходов.

Ключевые слова: блок-модульный термический реактор, термогаз, пиролиз, газификация, термоэлектрические генераторы.

O.I. GORINOV, candidate of technics,
V. F. NIKISHOV, candidate of technics
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34

Technological scheme of the autonomous power supply on the basis of the block-modular thermal reactor

Abstract. Mobile thermal reactor for the production of gaseous fuels from waste is considered.

Key words: block-modular thermal reactor, thermogas, pyrolysis, gasification, thermoelectric generator.

Блок модульный термический реактор [1] предназначен для термического уничтожения органосодержащих отходов непосредственно на месте их вынужденного складирования.

При этом одновременно производится газообразное топливо, которое можно использовать для энергообеспечения различных потребителей, в том числе и на собственные нужды. Отличительной особенностью такой технологии является то, что не сырье поставляется в термический реактор, а сам реактор доставляется и устанавливается для работы на поверхности органической массы.

Блок-модульный термический реактор мобилен, то есть переставляется по поверхности отходов на другое место. Для удобства транспортировки и перестановки размеры терморектора небольшие - примерно 2х2 м в габаритах. Для большей эффективности терморекторы устанавливаются группами по 3-4 блок-модуля. При перестановке

одного из блок-модулей, его отключают от газовых сетей и разжигают на новом месте, используя газ соседних работающих реакторов.

Термогаз и продукты горения, имеющие температуру, порядка 1000°C транспортировать на большие расстояния нецелесообразно. Поэтому эффективнее их использовать на месте. Одной из схем преобразования химической энергии органических отходов, в том числе и бытовых (ТБО), в электрическую может служить схема (рис. 1), в которой производимый газ сжигается и в продукты горения направляются в котел-утилизатор. Пар из котла-утилизатора (КУ) в турбину, которая соединена с электрогенератором. В этой схеме, для конденсации пара от турбины и охлаждения продуктов горения можно применить термоэлектрические генераторы (ТЭГ), разработка и внедрение которых в последнее время интенсифицируется. В основу принципа действия ТЭГ положен эффект Томаса Зеебека, на основании которого соединенные с одной стороны два разных проводника и помещенные этой стороной в нагретую область с другой стороны выдают термо-ЭДС. То есть происходит прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.

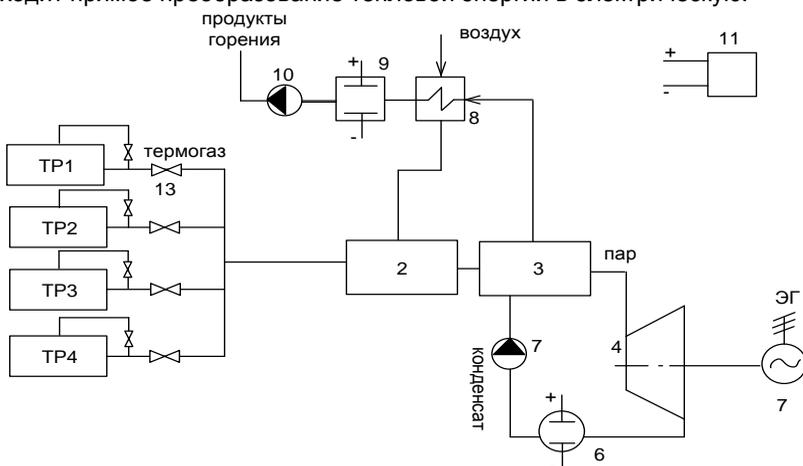


Рис. 1. Принципиальная схема автономного энергообеспечения на основе термического реактора блок-модульного типа:

- 1 – термический реактор блок-модульного типа; 2 – камера сгорания;
- 3 – котел-утилизатор; 4 – паровая турбина; 5 – электрогенератор;
- 6 – конденсатор; 7 – питательный насос; 8 – воздухоподогреватель;
- 9 – охладитель продуктов горения; 10 – дымосос; 11 – инвертор

Применяя термоэлектрические генераторы для отвода тепловой энергии в конденсаторе и охладителе продуктов горения, можно получить электрическую энергию в количестве теплоты сконденсированного пара и теплоты охлажденного газа и с помощью инвертора преобразовать ее параметры к параметрам электрической сети

При использовании в качестве устройства выделяющего тепловую энергию от частичного сжигания термогаза для обеспечения процессов пиролиза и газификации, радиационные трубы, в составе термогаза будут отсутствовать продукты горения и теплотворная способность его будет выше и составляет $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 14800 \text{ кДж/м}^3$.

При работе одновременно четырех термических реакторов блокомодульного типа выход термогаза составляет более $1500 \text{ м}^3/\text{час}$. Выход и состав производимого термогаза следующий " H_2 "=0,27%; " CH_4 "=9,68% и " CO "=90,05%.

Сжигание термогаза в камере сжигания позволяет получить дымовые газы с высокой температурой, которые направляются в котел – утилизатор для выработки перегретого пара. Паровая турбина с электрогенератором вырабатывает электрическую энергию для потребительских нужд населения. Отработанный пар и дымовые газы имеют энергию, которую можно извлечь посредством термоэлектрических генераторов и использовать на собственные нужды.

Представляемая технология термического реактора позволят спроектировать автономный комплекс энергоустановок использующих органическое сырье, в том числе и отходы, для нужд потребителей, решая и энергетическую, и экологическую проблемы.

Предлагаемая технология позволит получить и преобразовать энергию в доступный для использования потребителем вид - электрическую. Автономная энергетическая установка может обслуживаться одним человеком и покрывать нужды в энергии нескольких потребителей.

Литература

1. Патент № 2536896 "Переносная установка для термической переработки твердых бытовых отходов на полигоне".

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. Рафаковская 34
E-mail: kafedra@tot.ispu.ru

Энергосбережение при обжиге керамического кирпича в туннельных печах

Обжиг керамического кирпича представляет собой сложный технологический и теплофизический процесс. При обжиге под влиянием теплового воздействия в керамических массах протекают физико-химические процессы, связанные с различной степенью спекания материала. При этом для получения высококачественных изделий, не име-

ющих трещин и деформаций, необходимо обеспечить рациональный режим термической обработки, заключающийся в равномерном нагреве и охлаждении изделий по всей массе с допустимой скоростью изменения температуры. Для обжига керамического кирпича применяют туннельные печи, обладающие большими потенциальными возможностями для повышения их энергетической, технологической и экономической эффективности за счет совершенствования режимов работы данных высокотемпературных установок.

В качестве объекта исследования выбрана туннельная газовая печь фирмы «Fuchs», предназначенная для обжига керамического кирпича. Туннельная печь располагается над сушилом, при этом сушило и печь представляют собой единую технологическую цепочку. Длина сушильного и печного туннелей 132 м, ширина – 4 м. Каждый туннель вмещает в себя 44 вагонетки с кирпичом. По длине печь делится на три зоны: нагрева, обжига и охлаждения.

Особенностью технологии фирмы «Fuchs» является отказ от многорядной садки - каждый кирпич ставится на вагонетку отдельно на тычок с зазором по отношению к соседним изделиям. Расстояние между кирпичами в рядах ~10÷15 мм; между рядами ~20÷30 мм. Количество кирпичей на вагонетке составляет 760÷830 шт. Подина вагонетки выполнена из ребристых плит, опирающихся на столбики. В этом случае газовая среда имеет возможность проходить под плитами и кирпичами. Таким образом, достигаются практически однородные условия теплообмена на всех поверхностях обрабатываемых изделий

Математическое моделирование тепловой работы данной печи основано на совместном решении задач внешнего и внутреннего теплообмена [1].

Для решения задачи внешнего теплообмена применен резольвентный зональный метод [1]. Рабочее пространство туннельной печи было разбито на 44 расчетных участка. При этом в пределах каждого участка было выделено четыре поверхностные и одна объемная расчетные зоны. Зона 1 соответствует тепловоспринимающей поверхности обжигаемых изделий, зона 2 – поверхности свода печи, зоны 3 и 4 – боковым поверхностям кладки, а зона 5 – газовому объему. Кроме этого, для первого и последнего расчетных участков были введены дополнительные зоны, соответствующие поверхностям футерованной заслонки печи.

Температуры зон на поверхности кладки и объемных газовых зон рассчитывают в результате решения системы зональных уравнений:

$$\sum_{(j,n)} (a_{(j,n)-(i,m)} T_{(j,n)}^4 + g_{(j,n)-(i,m)} T_{(j,n)}) + g_{(i,m)}^0 - Q_{(i,m)}^{\text{пот}} = 0, \quad (1)$$

$$\sum_{(j,n)} (a_{(j,n)-(i,5)} T_{(j,n)}^4 + g_{(j,n)-(i,5)} T_{(j,n)}) + g_{(i,5)}^0 + Q_{(i,5)}^V = 0, \quad (2)$$

где $a_{(j,n)-(i,m)}$ – коэффициенты радиационного теплообмена; $g_{(j,n)-(i,m)}$ – коэффициенты конвективного теплообмена; $g_{(i,m)}^0$ – сумма слагаемых, не зависящих от зональных температур; $Q_{(i,m)}^{\text{пот}}$ – потери тепла через футеровку печи в окружающую среду; $Q_{(i,5)}^V$ – мощность тепловыделений в объемной зоне за счет сгорания топлива.

Результирующий тепловой поток на поверхности обжигаемых изделий находят по формуле:

$$\tilde{Q}_{(i,m)} = \sum_{(j,n)} (a_{(j,n)-(i,m)} T_{(j,n)}^4 + g_{(j,n)-(i,m)} T_{(j,n)}) + g_{(i,m)}^0. \quad (3)$$

Зная результирующий тепловой поток на поверхности садки, решают задачу внутреннего теплообмена и определяют нестационарное температурное поле обжигаемых изделий.

Садка туннельной газовой печи состоит из отдельно стоящих на поду вагонетки пустотелых кирпичей. При этом размер пустот и величина зазор между кирпичами соизмеримы между собой. В этой связи обжигаемые изделия можно рассматривать как сплошную однородную среду, с эффективными теплофизическими свойствами, которая перемещается в печи с постоянной скоростью u .

В этом случае температурное поле садки описывается двумерным дифференциальным уравнением теплообмена:

$$c'_{\text{эф}}(T)u \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{\text{эф}}(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v, \quad (4)$$

где T – температура; $c'_{\text{эф}}$ – эффективная теплоемкость; $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент теплопроводности; u – скорость перемещения садки; y, z – координаты; q_v – затраты тепла на протекание эндотермических реакций.

Эффективные теплофизические свойства садки рассчитывают по формулам:

$$\lambda_{\text{эф}} = \lambda \cdot (1-f) \cdot k_1, \quad c'_{\text{эф}} = c' \cdot (1-f) \cdot k_2, \quad (5)$$

где λ, c' – коэффициент теплопроводности и удельная объемная теплоемкость керамического кирпича; f – порозность кирпича; k_1, k_2 – поправочные коэффициенты, определяемые в результате методических расчетов.

Краевая задача теории теплопроводности решена методом конечных разностей по неявной конечно-разностной схеме. Аппроксимация дифференциального уравнения теплопроводности и краевых условий выполнена методом контрольного объема.

Согласование решений задач внешнего и внутреннего теплообмена, то есть решение сопряженной задачи теплообмена в туннельной газовой печи производится по итерационному алгоритму. Математическая модель тепловой работы туннельной газовой печи реализована в виде вычислительной программы. Достоверность результатов, получаемых при использовании разработанной математической модели, была проверена путем сопоставления с данными промышленных испытаний [2].

При помощи математической модели получена зависимость между производительностью печи (П) и расходом топлива (В), которая представлена в виде графика (рис. 1). Зависимость $P=f(B)$ рассчитана для разных значений максимальной температуры обжига при соблюдении допустимых скоростей нагрева и охлаждения керамического кирпича. Данный график позволяет оперативно определять рациональный режим обжига, обеспечивающий заданное качество продукции.

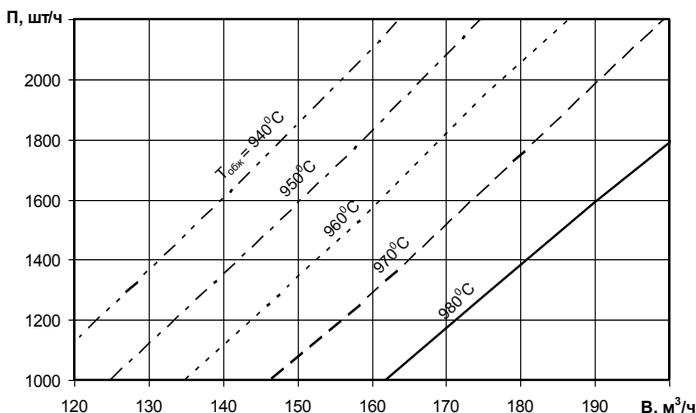


Рис. 1. Зависимость производительности туннельной газовой печи (П) от расхода топлива (В)

Литература

1. Арутюнов В.А., Бухмиров В.В., Крупеников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: Учебник для вузов. - М.: Металлургия, 1990. - 239 с.
2. Бухмиров В.В., Гнездов Е.Н., Ракутина Д.В. Исследование качества керамического кирпича после сушки и обжига по технологии фирмы «FUCHS» // Вестник ИГЭУ - Иваново: ГОУ ВПО «ИГЭУ имени В.И. Ленина», 2005. Вып. 1. - С.57-61.

УДК 624.365.3:536.3

В.В. БУХМИРОВ, д.т.н., профессор,
М.Г. СУЛЕЙМАНОВ, аспирант

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

Программа для расчета температурного поля насыпной садки

Термические садочные печи используются в машиностроительной промышленности для нагрева и термической обработки изделий и являются самыми энергоемкими технологическими операциями. Существующие режимы термообработки не всегда учитывают протекание продуктов сгорания через пористую садку, что приводит к завышению времени её пребывания в печи, а, следовательно, к перерасходу топлива.

Для решения данной задачи была разработана математическая модель тепловой работы садочной печи [1], учитывающая инфильтрацию продуктов сгорания через пористую садку. Решение внешней задачи теплообмена выполнено упрощенным зональным методом [2], внутренняя задача решена методом конечных разностей с использованием чисто неявной схемы. Согласование внешней и внутренней задач теплообмена выполнено методом итерационного уточнения значений эффективных температур на границе расчетных подсистем.

Предложенная математическая модель тепловой работы термической садочной печи была реализована в виде программы расчета температурного поля насыпной садки на языке программирования Delphi. В качестве среды программирования была использована среда разработки Borland Delphi 2006, одним из преимуществ которой, являются визуальные методы построения приложений.

Программа состоит из трех расчетных блоков – блоков решения внутренней, внешней и сопряженной задачи теплообмена и двух вспомогательных блоков – блока расчета горения топлива и блока расчета угловых коэффициентов излучения.

После запуска программы на экран выводится главное меню, содержащее два доступных элемента – «Режим» и «Выход». Элемент меню «Режим» предназначен для выбора способа ввода исходных данных. Его активация предлагает пользователю взять за основу демофайл либо архивный файл с исходными данными предыдущих расчетов. После завершения работы с элементом «Режим» на экран выводится главное меню, на панели которого становятся доступными элементы меню «Параметры» и «Расчет».

Активация пункта меню «Параметры» выводит на экран подменю с вкладками «Конструкция», «Режим», «Газ», «Садка», «Настройка» и

«Схема», которые позволяют изменять соответствующие исходные данные для расчета.

После ввода исходных данных выполняют расчет температуры газа в зонах, температурного поля садки и температуры поверхности обмуровки. Расчет начинают активацией кнопки «Расчет» в меню программы.

После завершения расчета на экран выводятся результаты в виде графиков изменения во времени температуры поверхности и температуры центра садки, температуры газа в рабочем пространстве печи. Двойной клик на экране в области графика отображает исходные данные и результаты расчета в текстовом виде (рис. 1).

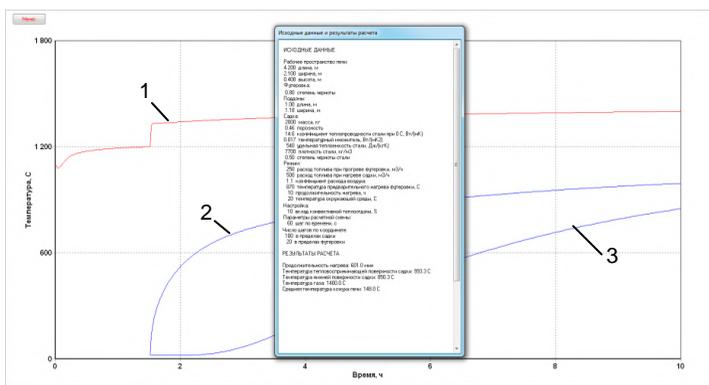


Рис. 1. Панель просмотра исходных данных и результатов расчета
 1 – температура газа; 2 – температура поверхности садки;
 3 – температура центра садки

Нажатие кнопки «Выход» завершает работу программы, при этом пользователю предлагается сохранить исходные данные и результаты расчета в виде текстовых файлов для последующего использования.

Для оценки влияния порозности на теплообмен в садке была решена тестовая задача, результаты которой представлены на рис. 2 и 3. Анализ рис. 2 показывает, что при порозности $f < 0,6$ температуры поверхности садки отличаются незначительно (не более чем на 5%), а при увеличении порозности садки до $f = 0,8$ температура поверхности садки превышает температуру садки при $f = 0,6$ на 85-115 °С.

Из рисунка 3 видно, что значения температуры центра садки для порозности $f = 0,2$ и $f = 0,4$ в конце нагрева практически совпадают. Нагрев центра садки более существенно зависит от порозности материала садки по сравнению с нагревом её поверхности.

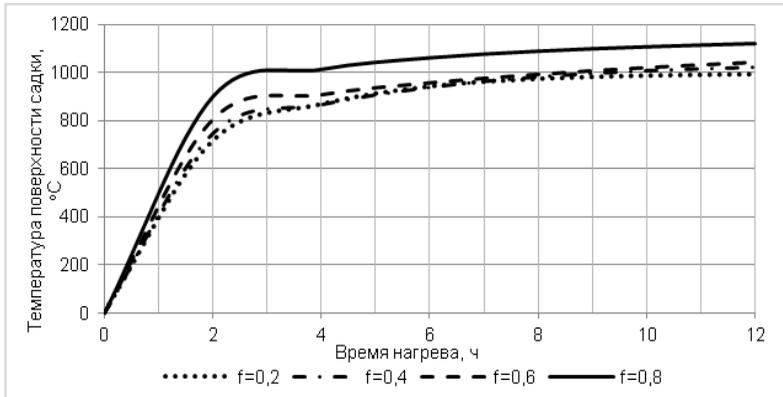


Рис. 2. Температура поверхности садки в зависимости от её порозности

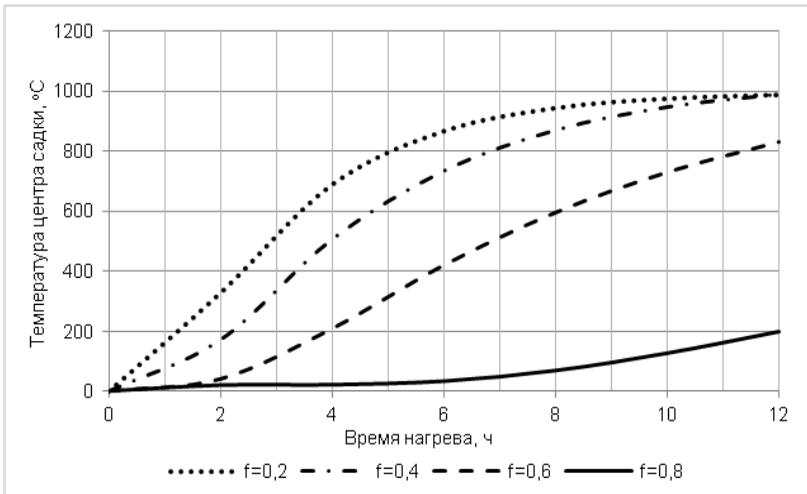


Рис. 3. Температура центра садки в зависимости от её порозности

Вывод. Разработана вычислительная программа, которая позволяет рассчитывать нагрев садки с заданными теплофизическими свойствами и пористостью. Приведены результаты тестовых расчетов.

Литература

1. **Моделирование** теплообмена в садочной печи / В.В. Бухмиров, О.Б. Колибаба, М.Г. Сулейманов // Энергосберегающие технологии в промышленности.

Печные агрегаты. Экология. VII Международная научно-практическая конференция, 15-17 октября 2014 г., г. Москва: материалы конференции.— Москва: Издательский дом МИСиС.— 2014. — С.398 – 401

2. **Бухмиров В.В.**, Крупенников С.А. Упрощенный зональный метод расчета радиационного теплообмена в поглощающей и излучающей среде // Изв. вуз. Черная металлургия. –1999. –№1. –С. 68–70.

УДК 620.93

О.В. САМЫШИНА, аспирант, О.И. ГОРИНОВ, к.т.н., доцент

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

Способ и конструкция терморектора для производства газообразного топлива из органосодержащих отходов

Аннотация. Рассмотрены способ и конструкция передвижного термического реактора для получения газообразного топлива из бытовых отходов.

Ключевые слова: блок-модульный термический реактор, термогаз, пиролиз, газификация.

GORINOV O.I., candidate of technics,
SAMYSHINA O. V., postgraduate student

Method and design of thermal reactor for the production of gaseous fuels from organic waste

Abstract. The method and design of mobile thermal reactor to produce gaseous fuel from waste is considered.

Key words: block-modular thermal reactor, thermogas, pyrolysis, gasification, thermoelectric generator.

Задача производства энергии на основе нетрадиционных источников энергии является актуальной и, в последнее время, приобретает жизненно важное значение. Особенно это имеет место в отдаленных районах, где отсутствуют традиционные источники энергии (газ, уголь), но имеются в большом количестве различные органосодержащие отходы (опилки, древесная кора, пластмасса, твердые бытовые отходы и т. п.). Перспективным представляется получение газообразного топлива и энергии в автономных энергетических системах, структурной составляющей которых является термический реактор по переработке органического сырья. Подавляющее большинство существующих термических реакторов перерабатывают предварительно подготовленные и сорти-

рованные отходы, которые доставляются к месту переработки транспортными средствами. В связи с этим актуальным является разработка способа [1] и установки для термической переработки органического сырья непосредственно на месте его складирования (полигоне).

Наиболее перспективным направлением видится в создании технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на базе блок-модуля печи (термореактор), перерабатывающего органическое сырье, в том числе и бытовые отходы на месте их складирования, в термогаз, процессами пиролиза и газификации.

Устройство для термической переработки [2] несортированных твердых бытовых отходов, выполненное в виде печи – колпака (рис. 1) устанавливается на полигоне непосредственно на слой ТБО.

Установка термической переработки ТБО включает в себя корпус 1 в виде прямоугольной камеры, устанавливаемой на слой ТБО непосредственно на полигоне. Корпус печи представляет собой кожух с футерованными огнеупорным материалом стенами 2 и плоским сводом 3, который оборудован системой газовых горелок 4. Количество горелок в системе сводового отопления печи и их взаимное расположение определяются достаточностью, обеспечивающей равномерность прогрева и термической переработки слоя ТБО, причем высота подвеса горелок не должна превышать 1 метра. Корпус печи обрамлен каркасом 5, состоящим из известным образом выполненных металлоконструкций. Для внедрения в слой ТБО нижняя опорная часть металлоконструкций заканчивается выступающей нижней кромкой 6. В нижней части к каркасу с внешней стороны по периметру крепится коллектор 7 для сбора термогаза. В коллектор 7 вмонтирована труба 8 для отвода термогаза и подачи части его к горелкам 4 и штуцерами: 9 – для подачи термогаза внешнему потребителю и 10 – для подачи пускового топлива на розжиг горелок 4.

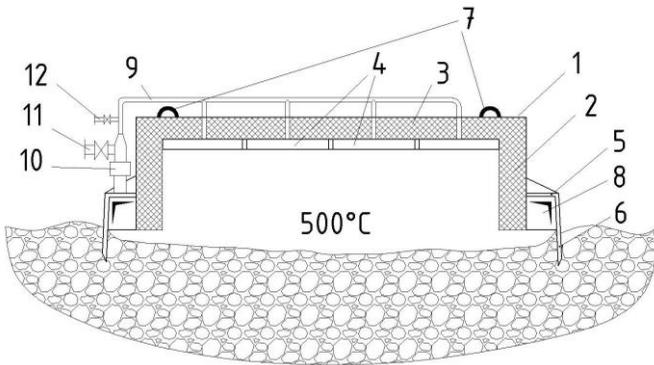


Рис. 1. Термический реактор-модуль камерного типа

Установка работает следующим образом. Печь устанавливают на полигоне непосредственно на слой ТБО. Производят розжиг горелок 4 путем подачи в них пускового газообразного топлива через штуцер 10. Газовые горелки, работая по принципу беспламенного сгорания газозвушной смеси на поверхности пористой керамики, организуют равномерные лучистые потоки, воздействие которых на слой ТБО приводит к его термическому разложению при температуре не ниже 1000 С. Тепловая энергия процесса распространяется вглубь слоя, обеспечивая его постепенный прогрев и подсушку. Образующиеся в результате термического разложения ТБО газообразные продукты (термогаз), отводят из камеры печи и направляются в коллектор снизу для последующей подачи внешнему потребителю через штуцер с частичным возвратом на сжигание в горелки 4. После выхода на рабочий режим производят отключение подачи пускового газообразного топлива в горелки 4, которые в дальнейшем будут работать на термогазе. Процесс осуществляют до полного уничтожения порции ТБО. Затем печь переустанавливают на другое место на полигоне для ликвидации следующей порции ТБО.

На полигоне можно устанавливать группу печей одновременно.

Выход термогаза от терморектора блок-модульного типа при скорости термических процессов $w=10^{-4}$ м/с и плотности твердых бытовых отходов $\rho_{\text{ТБО}}=400$ кг/м³ составляет порядка 410 м³/час.

Состав термогаза представлен в табл. 1.

Таблица 1. Выход и состав термогаза

H ₂	N ₂	CH ₄	CO
0,16%	25,87%	5,89%	68,08

Наличие азота в термогазе обусловлено воздухом идущего на горение части его для обеспечения энергией процессов термического разложения. Теплотворная способность термогаза $Q_n^p=5240$ кДж/м³, но учитывая что термогаз выходит из терморектора с температурой не ниже 1000°С внутренняя энергия его составляет 6840 кДж/м³, что позволяет использовать его в котлах утилизаторах.

Литература

1. Патент №2525558 "Способ порционной термической переработки несортированных твердых бытовых отходов на полигоне".
2. Патент № 2536896 "Переносная установка для термической переработки твердых бытовых отходов на полигоне".

УДК 658.26

В.Ю. ПРОНИН, к.т.н., доцент

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

Утилизация тепла ПВС отделочных производств

Аннотация. По результатам промышленных испытаний проведен анализ работы теплообменного оборудования. Для повышения эффективности эксплуатации разработаны оптимальные конструктивные параметры теплообменника. Использование полученных результатов направлено на повышение экономической эффективности эксплуатации теплообменного оборудования в условиях действующего производства.

Ключевые слова: контактный теплообменник, отделочная линия, оптимизация, конструктивные параметры.

PRONIN V.U., candidate of technics

Air-steam mixture heat recovery for finishing works

Abstract. According to the results of industrial tests analysis of the equipment. To improve the efficiency of operation of the optimal design parameters designed heat exchanger. The use of the results is aimed at improving the cost-effectiveness-efficiency operation of heat exchange equipment in existing production.

Key words: contact heat exchanger, finishing line, optimization, design parameters.

Для отделочных производств текстильных предприятий самой энергозатратной стадией является промывка и сушка ткани. На данные процессы расходуется до 30% тепловой и до 40% электрической энергии, потребляемой отделочным производством. Причем большая часть, до 80% тепловой энергии, теряется с отходами – со сточной водой промывных ванн и паровоздушной смесью после сушильных камер.

Возврат этой энергии имеет место, но зачастую недостаточно эффективен из-за неоптимальных конструкций теплообменного оборудования.

На действующих отделочных линиях задача оптимизации теплообменников сводится к нахождению максимального годового экономического эффекта и соответствующих ему значений конструктивных параметров и может быть представлена в следующем виде:

$$\mathcal{E}_{\text{год}} = \mathcal{E}_{\Gamma} - aK - S_{\text{экс}} \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{\text{год}}$ – стоимость теплоносителя, который вырабатывается в контактом теплообменнике; a – амортизационные отчисления на монтаж теплообменника; K – капитальные затраты; $S_{\text{экс}}$ – эксплуатационные расходы.

Величина годового экономического эффекта в основном определяется стоимостью теплоносителя, который предлагается получать в контактном теплообменнике и эксплуатационными затратами. Так например, если в теплообменнике нагревается вода на технологические цели (промывка, приготовление красителя), то имеют место меньшие возможности варьирования границ изменений капитальных и эксплуатационных затрат, в отличие от того случая, когда решается задача выбора оптимального варианта при установке теплообменника для выработки чистого конденсата, который может быть направлен в качестве питательной воды. Известно, что стоимость питательной воды значительно выше, поэтому решение даже изолированной задачи оптимизации теплообменников для утилизации теплоты ПВС должно начинаться с выбора конструкции теплообменника исходя из анализа топливно-энергетического баланса предприятия.

Если на предприятии имеется своя котельная, необходимо сопоставлять оптимальные варианты рекуперативных теплообменников с разделом сред. В случае, когда на предприятии нет потребности в чистом конденсате, необходимо сопоставлять и оптимизировать конструкции контактных аппаратов из-за их явных преимуществ с точки зрения теплообмена.

Зависимость (1) можно представить в следующем виде:

$$\mathcal{E}_{\text{Год}} = f(K_T, R_T) \quad (2)$$

где K_T , R_T – соответственно режимные и конструктивные параметры теплообменника.

Если режимные параметры заданы, в случае установки теплообменника на действующем оборудовании, то варьируемыми параметрами могут быть только конструктивные размеры. Их изменением осуществляется поиск варианта с максимальным годовым экономическим эффектом и соответствующим ему оптимальными размерами теплообменника.

Оптимизация была проведена применительно к конструкции контактного теплообменника [1] для условий действующей линии промывки ткани на ООО «Самтекс».

Данный теплообменник противоточного типа выполнен из нержавеющей стали и собран из отдельных секций. По высоте теплообменника размещены ряды рамок с распределительными перфорированными планками, расположенными под определенным углом к вертикальной оси.

Предварительный выбор оптимальных конструктивных параметров – высоты насадки и количества планок был осуществлен на математической модели контактного теплообменника. По полученным геометрическим характеристикам изготовлен опытный образец аппарата, который был оборудован контрольно-измерительными приборами для проведения промышленных испытаний.

Основной задачей промышленных испытаний являлась проверка эффективности работы теплообменника в промышленных условиях.

В результате испытаний получена величина степени рекуперации от 60 до 90% (рис.1). Причем степень рекуперации заметно увеличивается с повышением расхода нагреваемой воды.

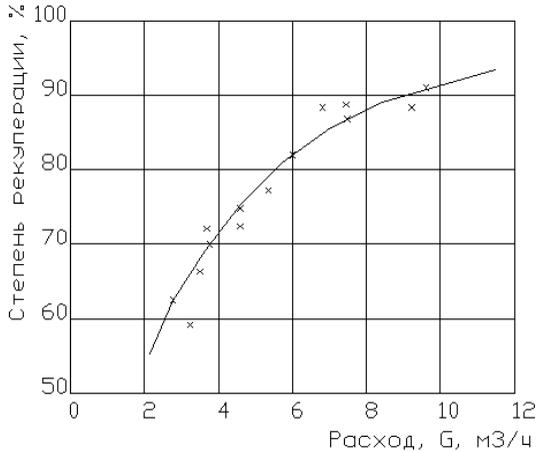


Рис. 1. Степень рекуперации тепла ПВС

Температура нагрева воды в теплообменнике снижается с увеличением ее расхода. При расходе воды 3,5 м³/ч максимальная температура достигает 65°C. При уменьшении расхода до 2 м³/ч вода может нагреваться практически до температуры мокрого термометра $t_m=78\div 79^\circ\text{C}$, что вплотную приближается к требованиям технологического регламента.

Таким образом, промышленные испытания подтвердили эффективность работы теплообменника, конструктивно оптимизированного для условий действующего производства.

Литература

1. Коротин А.Н., Торгов С.Л., Пронин В.Ю., Торгов Л.М., Смирнов А.А., Никишов В.Ф. Свидетельство РФ на полезную модель № 16675 от 27.01.2001 Бюл. № 3. Теплообменник.

УДК 669.162.252

Д.А. ДОЛИНИН, доцент

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

Оптимизация режимов работы оборудования очистки доменного газа

Аннотация. Рассмотрена схема очистки доменного газа от пыли. Разработаны математические модели для определения остаточной запыленности доменного газа. Разработаны режимные карты работы газоочистного оборудования, позволяющие повысить эффективность без снижения качества очистки.

Ключевые слова: доменный газ, очистка газа, режимная карта.

D.A. DOLININ, assistant professor
Ivanovo State Power Engineering University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: tevp@tvp.ispu.ru*

Operation optimization of blast furnace cleaning gas equipment

Abstract. A scheme of blast furnace gas cleaning system has been considered. The mathematical models to determine the residual dust content of gas have been developed. Parameter charts for blast furnace gas cleaning equipment, which allow increasing the efficiency without reduced quality of cleaning, have been developed.

Key words: blast furnace gas, gas cleaning treatment, parameter chart.

Каждый газоочистной аппарат и система газоочистки в целом имеет определенные требования и особенности режимов эксплуатации, выполнение которых позволяет получить максимальный эффект очистки газов при минимальных энергозатратах. Данные требования определяются режимными картами по эксплуатации газоочисток, которые составляются по результатам исследовательских работ. Снижение энергозатрат и повышение эффективности очистки доменного газа в скруббере и трубах Вентури могут быть достигнуты путем изменения режима их работы. Доменный газ используется на металлургических предприятиях в качестве топлива, и конечное содержание пыли в нем не должно превышать 4 мг/м^3 .

Существующие способы мокрой очистки не имеют контроля остаточной запыленности доменного газа, что ведет к значительному перерасходу воды на орошение. Одним из способов повышения эффективности мокрой газоочистки является разработка режимных карт на основе экспериментальных данных по запыленности доменного газа. Для оптимизации режимов работы газоочисток доменного газа требуется

ся контролировать остаточную запыленность и влажность газа, чтобы обеспечить минимально необходимый расход орошающей воды, не снижая при этом требуемого качества очистки.

При эксплуатации аппаратов мокрой очистки газов основными параметрами, характеризующими их работу, являются удельный расход воды на орошение, гидравлическое сопротивление, скорость газа в сечении аппарата и гранулометрический состав пыли.

Режимы работы и эффективность системы газоочистки зависят от целого ряда параметров. Необходимо отметить, что часть параметров может быть изменена по сигналу обслуживающего персонала с пульта газоочистки, например, расход воды на скруббер и трубы Вентури, перепад давления на трубах Вентури. Часть параметров зависит от режима работы доменной печи – расход, давление и температура газа на входе в газоочистку. Третья группа параметров определяется условиями окружающей среды. Важной задачей экспериментальных исследований являлось выявление и оценка параметров, влияющих на эффективность работы оборудования газовой очистки. Были определены параметры, которые оказывают наибольшее влияние на запыленность доменного газа, и уменьшение которых позволит сократить затраты на газоочистку и получить максимальный энергетический эффект. Рассматривались только те характеристики работы газовой очистки, для которых возможно точное задание и поддержание численных значений. Эти параметры: расход орошающей воды на скруббер, расход орошающей воды на трубы Вентури и перепад давления на трубах Вентури.

Полученные экспериментальные данные по запыленности доменного газа после скруббера и труб Вентури были использованы при создании математической модели для определения удельной запыленности доменного газа в зависимости от его расхода и расхода воды на орошение. Для создания математической модели был использован генетический алгоритм на основе нейросетевых технологий.

Для скруббера была создана модель для расчета удельного количества пыли в газовом потоке после скруббера. Входными данными для этой модели стали расход доменного газа и расход орошающей воды. Выходным параметром является запыленность доменного газа после скруббера.

Для труб Вентури были созданы две модели для определения степени очистки доменного газа (удельного количества пыли, которая улавливается трубами Вентури) и удельной остаточной запыленности газа после труб Вентури. В качестве входных данных для моделей использовались расход доменного газа, средний расход орошающей воды на трубы Вентури и средний перепад давления на трубах Вентури. Выходными данными являлись, соответственно, степень очистки доменного газа трубами Вентури и запыленность на выходе.

На полученных моделях была исследована эффективность работы газоочистного оборудования при изменении варьируемых пара-

метров в установленных пределах. Целью исследований было определение технически обоснованных норм расхода орошающей воды с сохранением требуемого качества очистки. Приоритетом являлось снижение расхода воды на газоочистку. В соответствии с этим строились режимные карты. Режимные карты составлены отдельно для скруббера и для труб Вентури. Для скруббера режимная карта построена на основе зависимости запыленности доменного газа после скруббера от расхода доменного газа и от расхода орошающей воды (рис. 1). При построении режимных карт для труб Вентури варьировался как расход воды на орошение, так и перепад давления.

Для оценки эффективности предложенных режимов работы скруббера было проведено их сравнение с существующими на основе информационной базы по режимам работы газоочистки. Анализ режимов показал, что в большинстве случаев скруббер и трубы Вентури работают неэффективно, так как завышен расход воды. Есть значительные резервы снижения расхода орошающей воды при сохранении качества очистки.

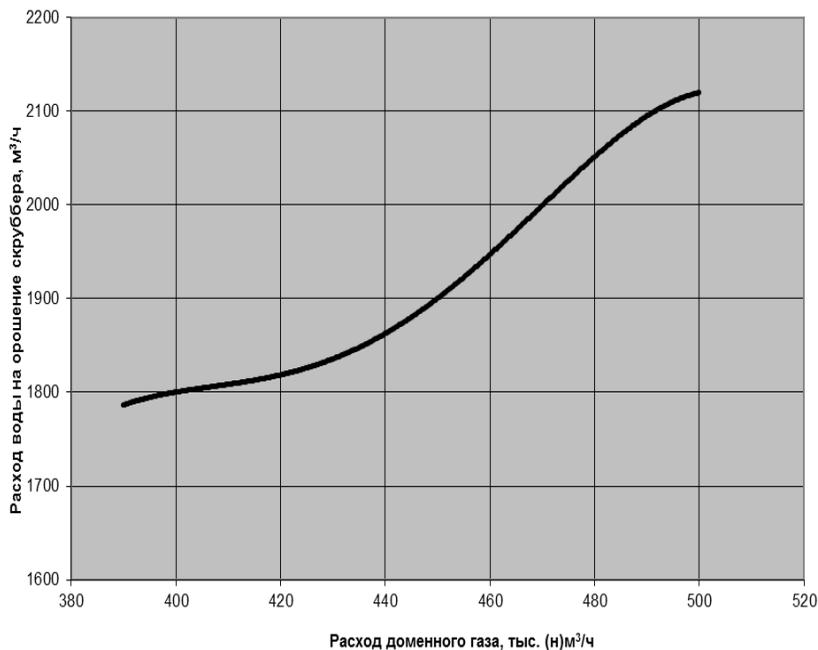


Рис. 1. Режимная карта скруббера

В результате нейросетевого моделирования получены технически обоснованные нормы расхода воды на скруббер и трубы Вентури. Ранее режим работы газоочистного оборудования выбирался на основе практического опыта эксплуатации без анализа остаточной запыленности.

Исследования показали, что при работе скруббера существует перерасход оборотной воды на орошение. При изучении работы труб Вентури исследования показали, что для достижения требуемой остаточной запыленности можно также значительно снизить расход воды.

Литература

1. **Осипенко В.Д., Васильченко Н.М.** Наладка и эксплуатация газоочистного оборудования в черной металлургии. – М.: Металлургия, 1983. - 144 с.
2. **Ужов В.Н.** Очистка промышленных газов от пыли./ В.Н. Ужов, А.Ю. Вальдберг, Б.И. Мягков, И.К. Решидов. – М.: Химия: 1981. – 392 с.
3. **Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю.** Очистка газов мокрыми фильтрами. - М.: Химия: 1972. – 250 с.
4. **Исследование** эффективных режимов очистки доменного газа / Горинов О.И., Долинин Д.А. // Тезисы докладов международной научно-технической конференции «XVI Бенардосовские чтения». – Иваново, 2011. Т. 2. – с. 214-217.
5. **Повышение** энергетической эффективности мокрой очистки газа в скруббере после доменной печи/ Горинов О.И., Долинин Д.А. // Материалы конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования ENERGY-2012». – Санкт-Петербург, Т. 2. – с. 380-389.

УДК 624.365

Г.А. ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ, аспирант, В.А. ГОРБУНОВ, д.т.н., доцент,
О.Б. КОЛИБАБА, к.т.н., доцент

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

Экспериментальное исследование влияния дутья на температурное поле при нагреве пористой садки в термической печи

Аннотация. Получена зависимость температур поверхности и центра пористой садки от ее порозности и фильтрации газа. Дана оценка энергетической эффективности нагрева пористой садки при различных режимах фильтрации

Ключевые слова: насыпная садка, температурное поле, фильтрация, термическая печь.

G.A.PEREVEZENTSEV, postgraduate student,
V.A.GORBUNOV, Doctor of Engineering,
O.B.KOLIBABA, candidate of technics

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

Porous batch temperature field calculation program

Abstract. The dependence of the surface and center temperature of the porous batch gas filtration has been shown. The estimation of the energy efficiency of heating the porous cages at various modes of gas filtration has been obtained.

Key words: porous batch, temperature field, filtration, heat furnace.

Совершенствование процессов в высокотемпературных установках, оценка и увеличение эффективности является главным источником резервов для экономии топлива и энергии в энергетике.

Целью экспериментального исследования является оценка энергетической эффективности нагрева пористой садки при различных режимах продувки.

В задачу экспериментального исследования входило определение температурного поля и оценка энергетической эффективности нагрева пористой садки при различных режимах продувки воздухом.

Нагрев каждой садки осуществлялся в 3-х режимах: без дутья; дутье со скоростью продувки 0,3 м/с; дутье со скоростью продувки 1 м/с.

Экспериментальная установка, схема которой показана на рис. 1, представляет собой камерную электрическую печь ШОЛ 36/14 с нагреваемой пористой садкой, состоящей из предварительно взвешенных колец Рашига.

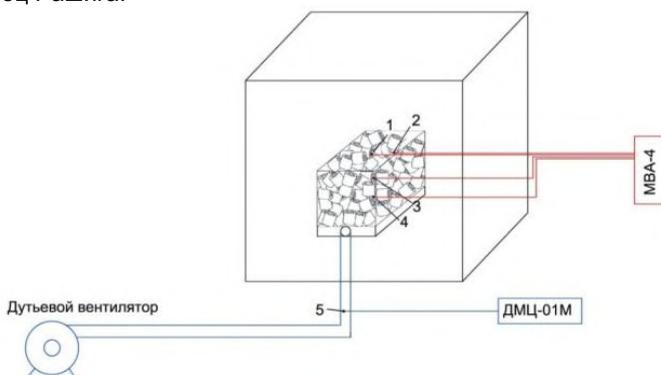


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:
1, 2, 3, 4 – точки замера температуры; 5 – точка замера параметров дутья

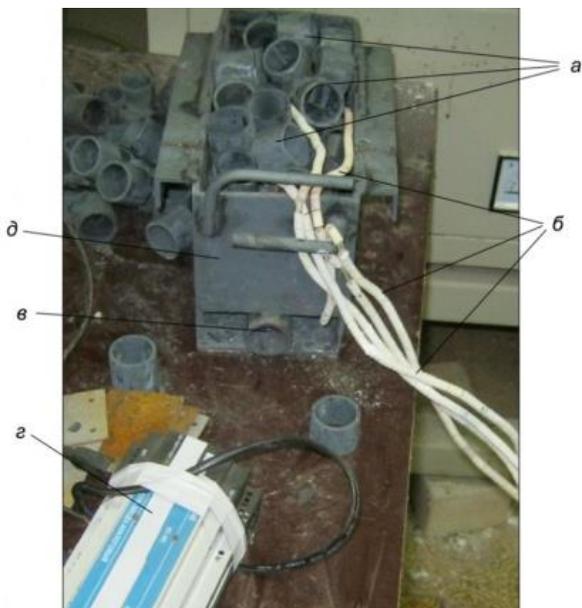


Рис. 2. Опытная садка

а) – нагреваемая садка; б) – термопары ТХА ; в) – входное отверстие для организации дутья ; г) – аналоговый модуль ввода МВА-4 .

В табл. 1 приведены результаты нагрева садки из колец Рашига.

В ходе эксперимента садка (рис. 2) загружалась в рабочее пространство предварительно разогретой до 900°C лабораторной печи в контейнере с открытой верхней частью, с габаритными размерами $0,1 \times 0,1 \times 0,25$ м. Для организации фильтрации в нижней части контейнера имеются отверстия.

В контейнер поступал воздух со скоростями $w_1 = 0,3$ м/с и $w_2 = 1$ м/с. Температура садки измерялась хромель – алюмелевыми термопарами. Сигнал с термопар поступал на аналоговый модуль МВА-4 и далее обрабатывался на компьютере. Скорость и расход воздуха фиксировались при помощи дифференциального цифрового манометра ДМЦ-01М. Температура печи в рабочем пространстве измерялась термопарой ТХА, температура воздуха в лаборатории измерялась лабораторным термометром.

В ходе эксперимента фиксировались температуры в 4-х характерных точках садки (рис. 1). Суммарная погрешность измерения температуры, определенная по ГОСТ Р.8.585–2001, составила $\pm 7,87^{\circ}\text{C}$.

Таблица 1. Основные параметры нагрева садки

Режим нагрева	Средняя скорость нагрева, град/мин	Удельные затраты энергии на нагрев одного кг садки, $\frac{кВт \cdot ч}{кг}$	Время достижения параметров качества, мин
Масса садки $m_1=3,102$ кг			
Нагрев колец Рашига $d=21$ мм, при отсутствии дутья	13,99	2,411	66
Нагрев колец Рашига $d=21$ мм, при фильтрации воздуха через садку с расходом $1,687 \cdot 10^{-4}$ кг/с	24,91	1,789	49
Нагрев колец Рашига $d=21$ мм, при фильтрации воздуха через садку с расходом $7,32 \cdot 10^{-4}$ кг/с	23,24	2,149	59

Проведенный анализ данных, полученных в ходе эксперимента, позволяет сделать вывод, что удельные затраты энергии на нагрев при наличии дутья при нагреве пористой садки могут снижаться. Это зависит от температуры дутья и пористости садки.

Литература

1. Пуговкин А.У. Рециркуляционные пламенные печи / А.У. Пуговкин. – Л.: Машиностроение, 1975. – 200 с.
2. Бровкин Л.А. К решению задач теплопроводности в пористом теле / Л.А. Бровкин // Изв. ВУЗов. Энергетика, 1987, №2. С.63-67.

УДК 621.321

О.И. ГОРИНОВ, к.т.н., профессор, О.Б. КОЛИБАБА, к.т.н., доцент,
Р.Н. ГАБИТОВ, аспирант

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

Использование регрессионной модели для определения теплофизических свойств слоя твердых органических отходов

Аннотация. Предложена регрессионная модель, позволяющая прогнозировать изменение теплофизических свойств в процессе термической переработки сырья. Получена функциональная зависимость эффективного коэффициента температуропроводности слоя ТБО от влажности сырья, порозности слоя и его температуры. Использование регрессионной модели позволит корректно определять теплофизические свойства слоя ТБО в расчетах тепловых режимов печи-реактора по переработке органосодержащего сырья.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, термическая переработка, температурный режим, влажность

GORINOV O.I., candidate of technics,
KOLIBABA O. B., candidate of technics,
GABITOV R.N., engineer

Using the regression model for the determination of the solid waste layer thermophysical properties

Abstract. The authors constructed a regression model and obtained the functional dependence of the effective thermal diffusivity of the layer of solid waste materials from moisture, porosity layer and its temperature. Municipal solid waste, thermal processing, thermal reactor, the porous structure, the effective thermal diffusivity, porosity, humidity, regression mathematical model, design **of experiments**, regression coefficients. Using the regression model will properly determine thermophysical properties of the layer of solid waste in the calculation of thermal regimes reactor processing of organic raw materials.

Keywords: solid household wastes, thermal decomposition, temperature regime, humidity.

Загружаемые в печь-реактор твердые бытовые отходы представляет собой многокомпонентную геометрически неопределенную пористую структуру различного фракционного состава. В расчетах теплообменных процессов такую структуру можно заменить ее моделью – единым условным изотропным пористым телом, характеризующимся порозностью (пористостью) – отношением объема пор к общему объему пористого тела. Условному пористому телу приписывается непрерывное температурное поле и условные эффективные теплофизические свойства: плотность $\rho_{эф}$, теплопроводность $\lambda_{эф}$ и удельная теплоемкость $c_{эф}$, связанные воедино эффективным коэффициентом температуропроводности.

$$a_{эф} = \frac{\lambda_{эф}}{c_{эф} \rho_{эф}}, \quad (1)$$

Очевидно, что эффективные теплофизические свойства слоя ТБО зависят от порозности слоя, его температуры и влажности сырья.

Целью работы является получение функциональной зависимости эффективных коэффициентов температуропроводности слоя ТБО от влажности сырья, порозности слоя и его температуры. Учет этих факторов необходим для правильной организации режимов работы печи-реактора.

В основу исследования был положен натурный эксперимент с последующей обработкой с использованием теории планирования эксперимента. Планирование эксперимента связано с изучением зависимости критериев оптимизации от величины управляющих параметров, поэтому после постановки задачи модель объекта исследования примет вид: $Y = f(X_1, X_2, X_3)$.

Нами была проведена серия экспериментов по исследованию теплофизических свойств образца слоя ТБО различной порозности и

влажности при его нагреве до заданной температуры. В качестве исследуемого показателя рассматривался эффективный коэффициент температуропроводности.

Экспериментальная установка представляла собой контейнер, заполненный ТБО среднего морфологического состава, изолированный с боков асбестовым волокном (рис. 1). Сверху размещался нагревательный элемент. В ходе нагрева производился замер температур в пяти точках по высоте слоя термомпарами типа ТХА в комплекте с преобразователем ОВЕН.

На основе полученных экспериментально температурных полей был найден эффективный коэффициент температуропроводности по уравнению (1). Эффективный коэффициент теплопроводности рассчитан по формуле Л.А.Бровкина [1], а эффективная удельная теплоемкость - по принципу аддитивности с использованием известных литературных данных [2].

Для построения регрессионной модели и получения функциональных зависимостей, исследуемых показателей на основе теории планирования эксперимента необходимо выбрать факторы планирования, области их изменения и произвести кодирование факторов. Остановимся на трех факторах, оказывающих влияние на эффективные теплофизические коэффициенты: среднеинтегральной температуре слоя ТБО, t , порозности слоя, f и влажности, W . Область варьирования каждого фактора может быть оценена на основе теоретических и экспериментальных данных по исследованию свойств компонентов ТБО [3].

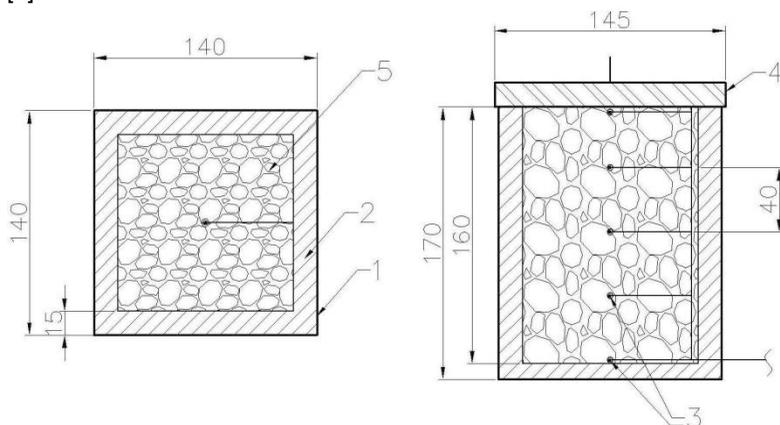


Рис. 1. Схема установки:

1 – контейнер; 2 – асбестовое волокно; 3 – термомпары; 4 – нагревательный элемент; 5 – ТБО

Область варьирования температуры принимаем в пределах $t = 20 \div 70^\circ\text{C}$, исходя из того, что нижний предел соответствует температуре окружающей среды, а верхний – началу выхода легких летучих соединений при нагреве слоя ТБО. Порозность слоя ТБО, находящегося на свалке или подвергаемого переработке в реакторе, обычно находится в пределах $f = 0,5 \div 0,7$ [4]. Для получения топливного газа с достаточно высокой теплотой сгорания влажность исходного сырья не должна превышать 30%. [5]. Поэтому область варьирования данного фактора примем в диапазоне $W = 10 \div 30\%$

В кодированном виде будет справедлива следующая форма записи варьируемых параметров:

$$X_1 = \frac{t - t_0}{\Delta t}, X_2 = \frac{f - f_0}{\Delta f}, X_3 = \frac{W - W_0}{\Delta W} \quad (2)$$

где X_1 – температура, $^\circ\text{C}$; X_2 – порозность; X_3 – влажность, %;

Искомую зависимость $a_{эф} = f(t, f, W)$ аппроксимируем полиномом второй степени с использованием планирования второго порядка.

Для решения задачи применяется композиционный ротатабельный план полного факторного эксперимента (ПФЭ). После обработки результатов экспериментов формула для расчета эффективного коэффициента температуропроводности имеет окончательный вид:

$$\begin{aligned} a_{эф} = & 1.002477 \cdot 10^{-6} + 9.9456 \cdot 10^{-11} t - 3.8141098 \cdot 10^{-6} f \\ & + 4.1768 \cdot 10^{-9} W + 2.3205 \cdot 10^{-9} tf - 1.85343 \cdot 10^{-11} tW \\ & - 4.7054 \cdot 10^{-9} fW - 5.4776 \cdot 10^{-12} t^2 + 4.1969 \cdot 10^{-6} f^2 - 1.4531 \cdot 10^{-11} W^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Выводы:

1. Предложена формула для расчета эффективного коэффициента температуропроводности слоя твердых бытовых отходов в зависимости от температуры, порозности слоя и влажности сырья.

2. Использование регрессионной модели позволит корректно определять теплофизические свойства слоя ТБО в расчетах тепловых режимов печи-реактора по переработке органосодержащего сырья.

Литература

1. **Бровкин Л.А.** Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах /Л.А.Бровкин // Иваново: ИЭИ, 1973. – 364 с.
2. **Гинзбург А.С., Громов М.А.** Теплофизические характеристики пищевых продуктов// М: 1980г, 288с
3. **Систер В. Г., Мирный А. Н., Скворцов Л. С., Абрамов Н. Ф., Никогосов Х. Н.** «Твердые бытовые отходы (сбор, транспорт и обезвреживание). // М: АКХ им. К.Д. Панфилова, 2001г
4. **Максимова С.В.** Методика определения объема и скорости образования метана на санитарных полигонах захоронения твердых бытовых отходов / С.В.Максимова, И.С.Глушанкова // Геозкология. - 2004. - №5. -С.433-438.
5. **Prabir B.** / Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory // Academic Press, 30 Corporate drive, Burlington, USA, page 365.

УДК 662.67

В.В. ХАСХАЧИХ, м.н.с.

Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского
119991, г. Москва, Ленинский проспект, д. 19
E-mail: v.khaskhachikh@gmail.com

«Экспериментальное исследование тепло-массообменных процессов переработки горючего сланца в установке с твердым теплоносителем (УТТ)»

Аннотация: результаты исследования позволяют более обосновано оценивать характер движения и качество смешения топлива и твердого теплоносителя в барабанном реакторе УТТ.

Ключевые слова: горючий сланец, установка с твердым теплоносителем, барабанный реактор, характер движения, качество смешения.

V.V. KHASKHACHIKH

G.M.Krzhizhanovsky Power Engineering Institute
119991, Moscow, Leninsky Prospect, 19
E-mail: v.khaskhachikh@gmail.com

«Experimental research of heat and mass transfer process of oil shale processing in solid heat carrier unit (SHC)»

Abstract. the results of this research can be used to reasonably estimate the character and quality of mixturing of oil shale and solid heat carrier in rotary drum reactor.

Key words: oil shale, solid heat carrier units, rotary drum reactor, character of movement, the quality of mixturing.

Продолжаются исследования направленные на улучшение процесса получения искусственного жидкого топлива из горючего сланца по технологии УТТ (рис. 1), в которой в качестве исходного сырья используется сланец фракции 0–25 мм, а в качестве твердого теплоносителя - сланцевая зола фракции 0–1 мм с температурой 750–800⁰С.

В качестве основного аппарата в технологии используется смеситель барабанного типа, в котором в результате тепло-массообменных процессов между топливом (горючим сланцем) и твердым теплоносителем (золой горючего сланца) осуществляется термическое разложение органической части топлива с образованием парогазовой смеси и коксозольного остатка. Установлено, что эффективность процесса разложения во многом зависит от качества смешения исходных полифракционных материалов [1].

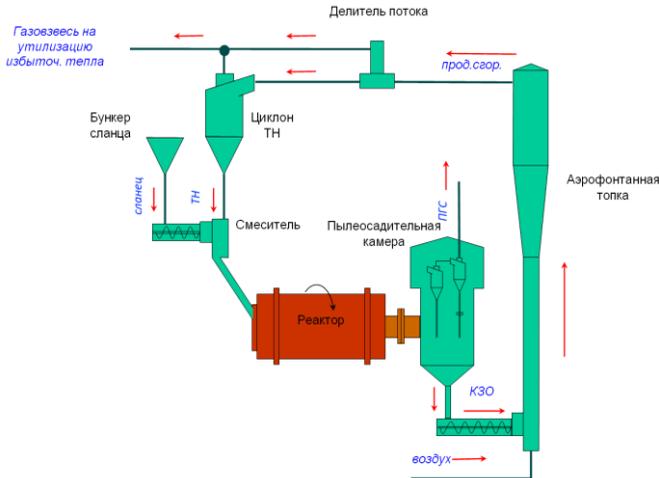


Рис.1 Принципиальная схема контура твердого теплоносителя УТТ

Моделирование процесса смешения проводилось на экспериментальном стенде «Модель реактора УТТ» (рис. 2). Определяемым фактором является коэффициент неоднородности $V_{c.i.}$ (1).

$$V_{c.i.} = \frac{100}{\bar{c}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2} , \quad (1)$$

где n – количество проб; c_i – концентрация в пробе; \bar{c} – средняя концентрация смеси.

В ходе исследований были разработаны и запатентованы: новый способ определения коэффициента неоднородности и устройство - специальный пробоотборник (рис. 3), с помощью которого проводились дальнейшие количественные исследования.

Установлено что при нахождении в смеси горючего сланца и теплоносителя фракции менее 0,1 мм в количестве более 30%, происходит изменение характера движения материала от пересыпания (рис. 4) к лавинообразным оползням (рис. 5), вследствие чего происходит изменение и в качестве смешения исходных материалов [2].

Таким образом, уже на первых минут вращения барабанного реактора достигается смешение исходных материалов (рис. 6 и рис. 7), и коэффициент неоднородности $V_{c.i.}$ не превышает 20%.



Рис. 2. Экспериментальный стенд «Модель реактора УТТ»

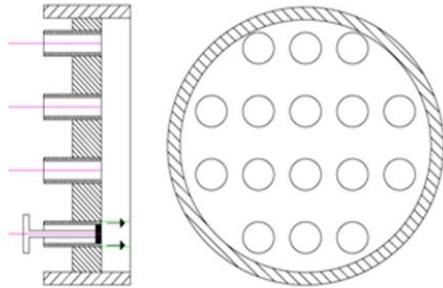


Рис. 3. Схема пробоотборника



Рис. 4. Фракции 0-0,1 мм <30 %

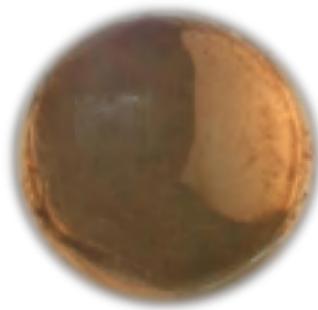


Рис. 5. Фракции 0-0,1 мм >30 %



Рис. 6. Распределение материалов на 1 минуте ($V_{c.i.} = 72\%$)

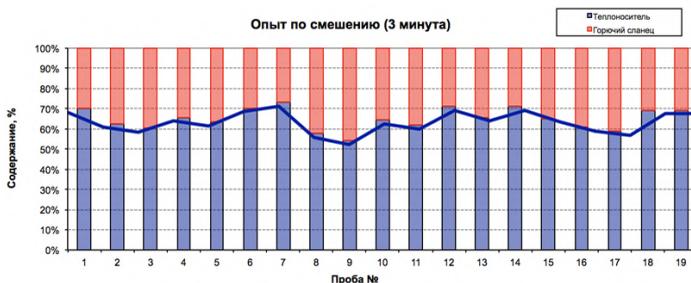


Рис. 7. Распределение материалов на 3 минуте ($V_{c.i.} = 19\%$)

Результаты исследования позволяют более обосновано оценивать характер движения и качество смешения топлива и твердого теплоносителя в барабанном реакторе.

Литература

1. **Термическая** переработка сланца-кукерсита / И.С. Галынкер, М.Я. Губергриц, Б.И. Тягунов и др., под редакцией М.Я. Губергрица / Таллин: "ВАЛГУС" , 1966. 355 с.
2. **Аппараты** для смешения сыпучих материалов / Макаров Ю.И.. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.

УДК 536.24:621.311.22.002.5

Н.В. ЖЕЛОНКИН н.с., А.Ю. РЯБЧИКОВ д.т.н., гл.н.с.,
 К.Э. АРОНСОН д.т.н., профессор, Д.В. БРЕЗГИН к.т.н., вед.н.с.
 Уральский федеральный университет имени первого Президента России
 Б.Н.Ельцина
 620000 г. Екатеринбург, ул. Мира, 19
 E-mail: lta_ugtu@mail.ru

Современные экологически безопасные маслоохладители для паротурбинных установок ТЭС

Конструкции установленных на ТЭС в схемах паротурбинных установок (ПТУ) маслоохладителей, которые были спроектированы в середине двадцатого века, не соответствуют современным требованиям по надежности, экономичности и экологической безопасности. Поэтому именно в настоящее время, когда срок эксплуатации теплообменных аппаратов устаревших конструкций подходит к концу, их совершенствование и создание новых теплообменных аппаратов для систем маслоснабжения ПТУ является актуальным и перспективным [1, 2].

Для примера рассмотрим серийный гладкотрубный маслоохладитель МО-53-4 и новый маслоохладитель МБ-50М-75 с трубками со встречной накаткой (ТВН) [3]. Усовершенствования относятся к наиболее повреждаемому элементу аппарата – трубному пучку и включают в себя следующие технические решения [1]:

- оптимизирована компоновка трубного пучка, на основе комплексного расчета тепловых, гидродинамических и надежностных характеристик аппарата;

- уплотнен фторопластом периферийный кольцевой зазор между промежуточными перегородками и корпусом маслоохладителя [4];

- использована трубка ТВН из нержавеющей стали (08Х18Н10Т). В серийном маслоохладителе МО-53-4 трубки из медно-никелевого сплава (МНЖ5-1). Применение материала трубок, с невысоким коэффициентом теплопроводности, компенсируется увеличением коэффициента теплоотдачи со стороны турбинного масла за счет профилирования;

- применена новая технология крепления трубок в трубных досках с кольцевыми рельефами в отверстиях; такое соединение имеет повышенную надежность, позволяет не использовать сварку при креплении трубок [1];

- применены трубные доски и водяные камеры из коррозионно-стойких материалов (12Х18Н10Т);

- присоединительные размеры соответствуют серийному маслоохладителю МО-53-4.

Для разработки новых маслоохладителей проведен комплекс экспериментальных исследований по изучению теплогидравлических процессов в трубных пучках с ТВН применительно к маслоохладителям ПТУ. Установлено, что интенсивность теплоотдачи от турбинного масла в пучке ТВН в диапазоне чисел $Re_m = 100...700$ до 33 % выше, чем в гладкотрубном пучке и зависит от режима течения турбинного масла в пучке трубок. С увеличением значения числа Re_m интенсивность теплоотдачи в пучках возрастает [5].

Сравнительные испытания маслоохладителей с гладкими трубками и ТВН проводились на турбинах К-160-130 ХТГЗ ст. № 8, 9 Невинномысской ГРЭС [6]. Заводом-изготовителем турбины оснащены четырем серийными гладкотрубными маслоохладителями МО-53-4. Во время планового ремонта на турбине ст.№9 установлен маслоохладитель МБ-50М-75 МО-3 с ТВН [3, 6], изготовленный по проекту УрФУ.

На исследуемом маслоохладителе реализованы режимы с температурой масла на выходе $t_{2м}$ от 19,2 до 36,0 °С, температурой охлаждающей воды на входе $t_{1в}$ от 1,5 до 7,5 °С, расходами масла G_m от 33 до 75 м³/ч и воды $G_в$ от 13 до 157 м³/ч.

На рисунке представлены результаты испытаний и результаты расчетов по разработанной авторами методике для всех реализованных режимов маслоохладителей в процессе испытаний. Видно хорошее согласование результатов расчета с проведенными опытами.

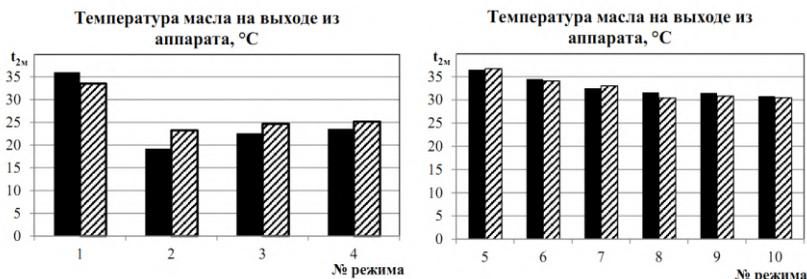


Рисунок. Результаты испытаний маслоохладителей МБ-50М-75 с ТВН (режимы 1-4) и МО-53-4 с гладкими трубками (режимы 5-10)

■ - результаты испытаний, ▨ - результаты расчета по методике УрФУ

Практическая значимость исследования заключается в том, что реализована новая теплообменная поверхность (ТВН) для маслоохладителей ПТУ, определены параметры профилирования трубок со встречной накаткой, рекомендуемые к реализации в маслоохладителях турбоустановок с учетом диапазонов характерных параметров технологических процессов в них; представлены рекомендации для инженерной практики в части уточнения позонной методики расчета маслоохладителя.

Промышленные испытания маслоохладителя с ТВН показали, что:

- маслоохладитель новой серии с ТВН охлаждает масло на 1,5-2 °С больше, чем маслоохладитель с гладкими трубками;
- гидравлическое сопротивление маслоохладителя с ТВН по масляной стороне при расходе масла через аппарат от 30 до 90 м³/ч до 15 % выше, чем маслоохладителя с гладкими трубками;
- гидравлическое сопротивление с водяной стороны маслоохладителя с ТВН (МБ-50М-75) на 30 – 60 % выше, чем маслоохладителя с гладкими трубками;
- количество передаваемой теплоты в аппарате с ТВН на 10...15 % выше, чем в аппарате с гладкими трубками.

Для сопоставления результатов испытаний маслоохладителей с различными типами поверхности теплообмена уточнена разработанная авторами позонная методика теплогидравлического расчета; результаты расчетов по уточненной методике удовлетворительно согласуются с результатами испытаний маслоохладителей.

Исследования проводились в рамках выполнения НИОКР по Госзаданию, заявка № 900 «Повышение эффективности и надежности теплообменного оборудования энергопотребляющих и энергогенерирующих установок».

Литература

1. Бродов, Ю.М. Повышение эффективности и надежности теплообменных аппаратов паротурбинных установок: 4-е изд., перераб. и доп. / Ю.М.

Бродов, К.Э. Аронсон, В.И. Брезгин, С.Н. Блинков, В.К. Купцов, М.А. Ниренштейн, П.Н. Плотников, А.Ю. Рябчиков, С.И. Хае́т, Д.В. Брезгин, Н.В. Желонкин, Г.А. Локалов; под общ. ред. Ю.М. Бродова. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина, 2012. — 570 с.

2. Бродов Ю.М. Новые маслоохладители для турбин большой мощности ЗАО УТЗ / Ю.М. Бродов, А.Ю. Рябчиков, К.Э. Аронсон, Н.В. Желонкин // Теплоэнергетика, 2014, № 12. С. 42–46.

3. Желонкин Н.В., Бродов Ю.М., Рябчиков А.Ю., Аронсон К.Э. Теплообменная труба / Патент на полезную модель № 112752, Российская федерация, МПК F28F1/00; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина». – № 2011134212/06; заявл. 15.08.2011; опубл. 20.01.2012, Бюл. 2. – 2 с.

4. Желонкин Н.В., Рябчиков А.Ю., Бродов Ю.М., Блинков С.Н. Кожухотрубный теплообменник / Патент на полезную модель 107850 Российская федерация, МПК F28F3/10; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина". – № 2010108031/06; заявл. 04.03.2010; опубл. 27.08.2011, Бюл. 24. – 2 с.

5. Интенсификация теплообмена при обтекании вязкой жидкостью пучков трубок со встречной накаткой / Ю.М. Бродов, А.Ю. Рябчиков, К.Э. Аронсон, Н.В. Желонкин // Тезисы Шестой Российской национальной конференции по теплообмену. В 3 томах (27-31 октября 2014 г., Москва) Т. 3. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. С. 32-33.

6. Желонкин Н.В. Результаты промышленных испытаний новой серии маслоохладителей с профилированными трубками / Н.В. Желонкин, А.Ю. Рябчиков, К.Э. Аронсон, И.Б. Мурманский // Энергетик. — 2014. — № 6. — С. 35-38.

СЕКЦИЯ «СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ»

УДК 621.18:62.52

Ю.С. ТВЕРСКОЙ, д.т.н., профессор;
А.Н. НИКОНОВ, к.т.н., доцент

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

К вопросу развития наукоемких этапов технологии создания многофункциональных АСУТП на базе ПТК

Аннотация. Рассматривается направление развития технологии создания автоматизированных систем управления технологическими процессами на базе программно-технических комплексов путем использования полигонов АСУТП.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, программно-технический комплекс, полигон АСУТП.

Yu.S. TVERSKOY, Doctor of Engineering, professor
A.N. NIKONOROV, Candidate of Engineering, docent

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

To the question of the stages of development of high technologies of creation of multi-functional automated process control system based on PTC

Abstract. Discusses the direction of development of technology of creation of the automated control systems of technological processes on the basis of program-technical complexes through the use of polygons APCS.

Key words: the automated control system, program-technical complex, proof ground for automated process control systems.

Современное развитие отечественной энергетики характеризуется вводом в действие энергоблоков, оснащенных распределенными многофункциональными автоматизированными системами управления технологическими процессами (АСУТП) на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой иерархической структуры. ПТК в этой структуре служит системообразующим компонентом, а АСУТП в целом формирует единую информационно-технологическую среду энергоблока [1-3].

Создание многофункциональных АСУТП осуществляется с применением новой сквозной технологии разработки, проектирования, изготовления, наладки и ввода «под ключ» АСУТП (рис. 1).

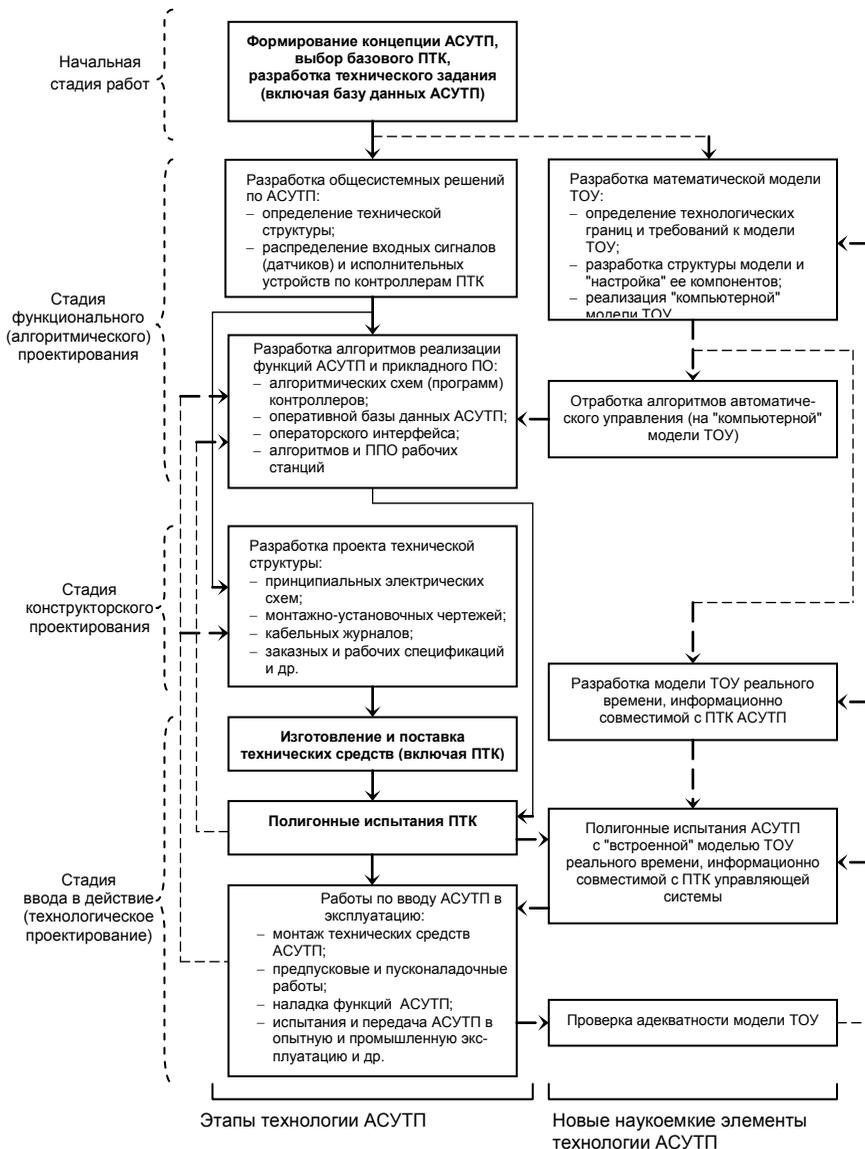


Рис. 1. Направления развития технологии создания АСУТП

Основной наукоёмкой задачей совершенствования сквозной технологии создания АСУТП является решение проблемы, связанной с трудностями обеспечения гарантированного ввода сложных систем управления, поскольку имеют место существенные риски от разного рода экспериментов по отработке алгоритмов управления и соответствующего программного обеспечения на «живом» оборудовании.

Для решения проблем недостаточной отработанности алгоритмов управления на ранних стадиях проектирования и неотлаженности системы в целом на этапе ввода ее в действие целесообразно использовать специализированные программно-технические средства – полигоны АСУТП [4, 5].

Решение этих проблем, а также эффективная подготовка (обучение) специалистов, задействованных в работах по созданию, вводу в действие (монтаж, наладка) и эксплуатации автоматизированного оборудования, могут быть обеспечены при условии, что программные и технические характеристики полигона аналогичны соответствующим характеристикам реальной АСУТП. Например, операторский интерфейс должен быть полностью идентичен интерфейсу операторских станций в составе АСУТП технологического объекта (энергоблока), а модель технологического оборудования должна быть всережимной, обеспечивающей однозначное количественное, качественное и временное соответствие объекту управления.

Более чем 15-летний опыт эксплуатации учебно-исследовательской лаборатории «Полигон АСУТП электростанций» показал, что подобные полигоны АСУТП позволяют решать три класса задач:

- учебные (полигон АСУТП как тренажерный комплекс);
- практические (полигон АСУТП как испытательный стенд);
- научные (полигон АСУТП как экспериментальная установка).

Основное назначение полигонов АСУТП как тренажерных комплексов – опережающая подготовка различных категорий специалистов, участвующих в процессе создания и освоения (эксплуатации) АСУТП тепловых электростанций. К категориям обучаемых специалистов целесообразно отнести не только персонал собственно электростанций (оперативный и ремонтный персонал цехов КТЦ, ЭЦ, АСУТП), но и основных подрядных организаций (инжиниринговых, наладочных и проектных организаций).

Использование полигонов АСУТП как испытательных стендов связано с решением проблем отладки отдельных алгоритмов системы управления и комплексной проверки правильности функционирования подсистем АСУТП.

В качестве экспериментальной установки полигоны АСУТП позволяют выполнять исследовательские (экспериментальные) работы, направленные на совершенствование сложных наукоёмких функций систем управления, на изучение динамических свойств управляющих

каналов различных ПТК, экспертизу декларированных в технико-коммерческих предложениях объективных параметров (контроллеров, рабочих станций и пр.), отработку (тестирование) сложных алгоритмов управления на ранних стадиях проектирования АСУТП

Совершенствование образовательных технологий за счет использования в учебном процессе функциональных средств лаборатории «Полигон АСУТП электростанций» позволило реализовать методологию эффективного обучения по новому направлению подготовки «Управление в технических системах».

Литература

1. **Теория и технология** систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн. 1. Проблемы и задачи / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – Кн. 1 – 260 с.
2. **Тверской, Ю.С.** Особенности и проблемы современного этапа развития технологии создания АСУТП тепловых электростанций / Ю.С. Тверской, С.А. Таламанов // Теплоэнергетика. – 2010. – №10. – С.37-44.
3. **Технология** АСУТП электростанций / под ред. проф. Ю.С. Тверского // Тр. междунар. науч.-техн. конф. «XII Бенардосовские чтения». – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2005. – 164 с.
4. **Тверской, Ю.С.** «Полигон АСУТП электростанций» – эффективное средство подготовки специалистов и тестирования сложных систем управления / Ю.С. Тверской, А.В. Голубев, А.Н. Никоноров // Теплоэнергетика. – 2011. – №10. – С. 70-75.
5. **Тверской, Ю.С.** Прикладное обеспечение полигонов АСУТП электростанций / Ю.С. Тверской, А.Н. Никоноров, Д.А. Пронин. – ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2012. – 174 с.

Тверской Юрий Семёнович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

Никоноров Андрей Николаевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

УДК 621.18:62.52

Д.Ю. ТВЕРСКОЙ, к.т.н.
Ю.С. ТВЕРСКОЙ, д.т.н., профессор;

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

Проблемы и задачи технологии многофункциональных АСУТП на этапе структурного синтеза систем автоматического управления

Аннотация. Рассматриваются проблемы и задачи технологии многофункциональных АСУТП на стадии функционального проектирования. Приводятся результаты развития методологии обобщенного термодинамического анализа в аспекте теоретического обоснования вектора управляемых параметров сложных объектов (технологических процессов) и структурного синтеза высокоточных систем управления.

Ключевые слова: многофункциональные АСУТП, «полевая зона», структурный синтез, САУ, термодинамический анализ.

D.Yu. TVERSKOY, Candidate of Engineering,
Yu.S. TVERSKOY, Doctor of Engineering, professor

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

Problems and challenges of technology multifunction process control system for structural synthesis of automatic control systems

Abstract. Discusses the problems and challenges of technology multifunctional process control systems at the stage of functional design. The results of the development of the methodology of the generalized thermodynamic analysis in the aspect of theoretical study of vector control of parameters of complex objects (technological processes) and structural synthesis of high-precision control systems.

Key words: multifunction process control system, "field zone", structural synthesis, automatic control system, thermodynamic analysis.

Одна из ключевых задач стадии функционального проектирования АСУТП связана с проблемами структурного синтеза эффективных (в аспекте того или иного принятого критерия оптимальности) систем автоматического управления (САУ) с целью обеспечения гарантированной технологической работоспособности контроллерного уровня АСУТП энергоблока [1-3].

Проблема структурного синтеза тесно связана с двумя направлениями исследований. Во-первых, это поиск информации для реше-

ния технологической задачи управления и формирование представительных сигналов (параметров, комплексов). Во-вторых, – выбор оптимального алгоритма управления и его реализация средствами программно-технических комплексов.

В теории автоматического управления (ТАУ) исходными данными для решения задачи синтеза служат уравнения математической модели объекта управления. При этом векторы входных X , Z и выходных Y , O параметров, формирующих «полевую зону» АСУТП, как правило, многомерного, многосвязного, переопределенного объекта управления полагается известными (рис. 1).

Однако, уравнения математической модели заданы, как правило, с той или иной степенью приближения/неопределенности, а выходные параметры объекта искажены случайными возмущениями, многие из параметров недоступны для непосредственного контроля. *Какому параметру (комплексу) отдать предпочтение в переопределенном векторе координат ТОУ с той целью, чтобы уже на ранней стадии проектирования не сделать принципиальных ошибок в формировании «полевой зоны» системы и структуры альтернативных схемных решений?* Например, в схемах регулирования подачи топлива и питания мощных котлов ТЭС используют сигналы по температуре в разных точках водопарового (ВПТ) и воздушно-газового тракта, комплексированные сигналы по теплоте за котлом или в промежуточном сечении ВПТ, энтальпии и др. [4].

На стадии эксплуатации представительность сформированных различными датчиками сигналов можно оценить экспериментальным путем, например, по многофакторному критерию - информационной емкости сигналов [5].

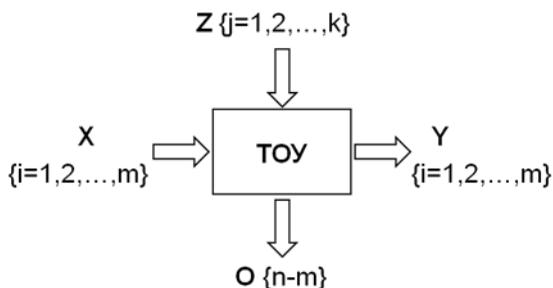


Рис. 1. Структура объекта управления

На стадии функционального проектирования САУ обоснование вектора выходных параметров объекта (задают, как правило, на основании опыта) и, соответственно, структуры системы до сих пор остается во многом не решенной актуальной задачей. Поэтому для аналити-

ческого конструирования высокоточных систем управления на ранних стадиях проектирования требуется разработка теории и методологии строгого определения вектора координат проектируемого управляемого технологического оборудования.

Поскольку обоснование выбора необходимой и достаточной информации всегда связано с процессами в технических и технологических системах, в основу развиваемой теории и методологии положены принципы обобщенного термодинамического анализа [6,7].

В настоящей работе впервые предпринята попытка некоторого обобщения результатов развития методологии термодинамического анализа, выполненного в аспекте теоретического обоснования вектора управляемых параметров сложных объектов (технологических процессов). Определены потенциалы и координаты пылеприготовительных систем на базе молотковых мельниц, мельниц вентиляторов, средних и шаровых барабанных мельниц, теплообменного оборудования паровых котлов и редуционно-охладительных установок ТЭЦ, бинарных энергоблоков ПГУ, первого и второго контуров АЭС и др. [1,8].

Обобщенными термодинамическими потенциалами служат, как правило, конструктивные показатели технической системы (установки, теплообменника).

Обобщенными термодинамическими координатами, характеризующими состояние управляемого процесса (ТОУ) служат изменяющиеся во времени режимные параметры, определяющие вектор Y управляемых координат и вектор O ограничений. Например, в пылесистемах по схеме прямого вдувания был найден ранее неизвестный комплексированный показатель, характеризующий кинетическую энергию потока мельничного продукта, что позволило решить задачу структурного синтеза регулятора подачи топлива в мельницы.

Полученные результаты говорят о перспективности развиваемого направления работ и могут служить основой синтеза альтернативных схем новых структур высокоточных локальных САУ.

Другая сторона проблемы технологии многофункциональных АСУТП, которую нельзя оставить незамеченной, скрыта в процедурах закупки основного технологического оборудования и связана с его априорной подготовленностью к решению задач автоматизации. Своего рода парадигма одного из критериев закупки основного оборудования энергоблока, характеризующего возможности формирования полноценной «полевой зоны» многофункциональной АСУТП энергоблоков электростанций.

Литература

1. **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. 1. Проблемы и задачи. – 260 с. Кн. 2. Проектирование. – 436 с. Кн.

3. Моделирование. – 176 с. ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013.
2. **Методы** робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления. Учебник. / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2002. – 744 с.
3. **Тверской Ю.С., Таламанов С.А., Агафонова Н.А.** Методы интервальной оценки частотных характеристик и робастной настройки систем управления / Под общей ред. д-ра техн. наук проф. Ю.С. Тверского. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И.Ленина, 2010. – 219 с.
4. **Тверской Ю.С.** Автоматизация котлов с пылесистемами прямого вдувания. М.: Энергоатомиздат, 1996. – 256 с.
5. **Тверской Ю.С.** Исследование сигналов, применяемых в системах регулирования расхода топлива прямооточных пылеугольных парогенераторов. Автореферат дисс. на соиск. уч.ст. канд. техн. наук. М.: МЭИ, 1973. – 32 с.
6. **Вейник А.И.** Термодинамика. – Минск: ВШ, 1965. – 404 с.
7. **Теория** моделей в процессах управления. Информационный и термодинамический аспекты / Б.Н. Петров, Г.М. Уланов, И.И. Гольденблат, С.В. Ульянов. М.: Наука, 1978.
8. **Тверской Д.Ю.** Обобщенный термодинамический анализ эффективности систем пылеприготовления. // Теплоэнергетика. - 2010, № 8. – С. 39-46.

Тверской Дмитрий Юрьевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

Тверской Юрий Семёнович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

УДК 621.18-5

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

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

Разработка и исследование подсистемы регулирования мощности энергоблока ПГУ-450 в структуре компьютерного тренажера

Аннотация. Система управления реализована на базе тренажера. В результате определены структура и параметры регуляторов турбины. Разработана схема переключения между локальным заданием и заданием общей мощности блока.

Ключевые слова: регулятор мощности блока, ПГУ, газовые турбины, тренажеры для электростанций, регулирование мощности.

A.V. GOLUBEV, Candidate of Engineering, docent,
I.A. KOLESOV, master student

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

Research and development subsystem to regulate the power unit PGU-450 in the structure of a computer simulator

Abstract. The control system is implemented on the basis of the simulator. The simulation and experimental studies determined the structure and parameters of the turbine regulators. A scheme of switching between local and block is designed.

Key words: power control unit, CCGT, gas turbines, simulators for power plants, capacity controller.

Значения частоты и мощности являются ключевыми показателями работы энергосистемы и жестко регламентируются стандартами, поэтому к системе регулирования мощности энергоблока уделяется особое внимание.

Сегодня для проведения экспериментов широко используются тренажерные комплексы, поскольку испытания на реальных объектах требуют больших затрат и могут привести к выходу из строя реального оборудования.

На базе тренажерного комплекса блока ПГУ-450 ТЭЦ-21 Мосэнерго, разработанного компанией ЗАО «Тренажеры для электростанций», проводится исследования регулятора мощности при различных режимах его работы [1].

Регулятор мощности блока представляет собой алгоритм, формирующий сигнал небаланса корректирующим регуляторам мощности газовых турбин (ГТ) ГТ-1 и ГТ-2. Корректирующие регуляторы ГТ1 и ГТ2 выполнены по одной схеме. Эти регуляторы воспринимают небаланс и преобразуют его по ПИ-закону. Исходя из этого была разработана структурная схема регулирования мощности блока (рис. 1).

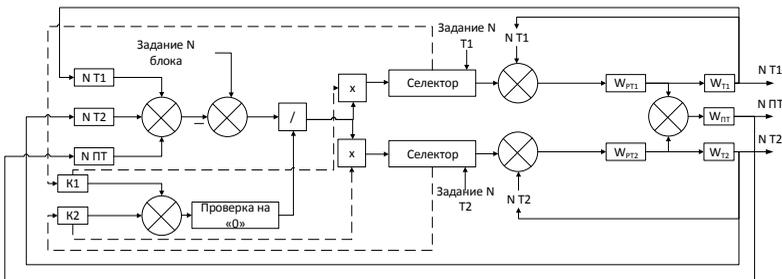


Рис. 1. Схема регулирования мощности энергоблока ПГУ

После идентификации объектов управления была собрана имитационная модель и проведены предварительные испытания. Поскольку на реальном блоке используется схема регулирования, отличная от использованной, поэтому полученные результаты носят оценочный характер и требуют дальнейшего уточнения.

В ходе испытаний на имитационной модели проведены эксперименты (рис. 2):

I. Первая турбина подключается к регулированию мощности блока на 3000 секунде.

II. Вторая турбина подключается к регулированию мощности блока на 9500 секунде.

III. Задание от РМБ (при регулировании только ГТ1) уменьшается на 50МВт через 8000 секунд.

IV. Задание от РМБ увеличивается на 80МВт через 12000 секунд.

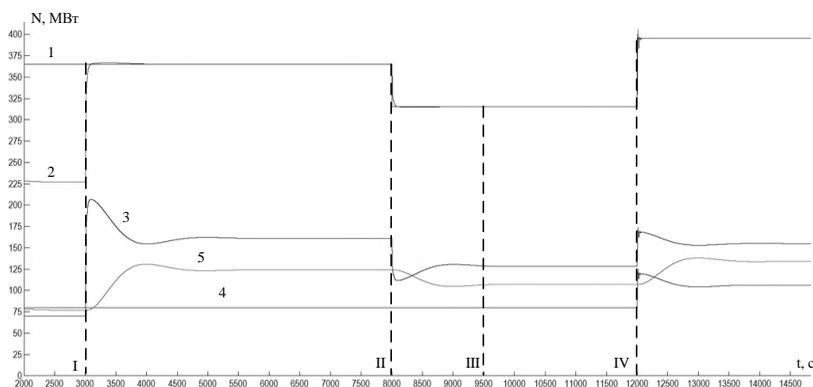


Рис. 2. Результаты эксперимента:

1 – заданная мощность от РМБ, 2 – суммарная мощность блока,
3 – мощность ГТ1, 4 – мощность ГТ2, 5 – мощность ПТ

На рисунке видно, что в ходе экспериментов газовые турбины компенсируют инерционность паровой турбины, только в ходе последнего испытания суммарная мощность имела видимое отклонение, которое осталось в допустимых пределах. Предложенная схема показала свою работоспособность.

Однако имитационная модель схемы является упрощенной и не учитывает влияния нелинейностей в объекте и работы остальных регуляторов блока, поэтому дальнейшим шагом является испытание схемы на базе тренажерного комплекса и проверка ее работоспособности в условиях работы в многосвязной системе. Для этого приведенная схема реализуется в составе тренажера [2].

Разработанный операторский интерфейс тренажёра (рис.3) формируется на основе информации из базы данных, которая содержит перечень точек контроля и арматуры, технологических сигнализаций, защит и защитных блокировок.

В модели тренажера прописана логика формирования задания мощности (рис. 1) для каждой из турбин в основных режимах работы. В ходе выполнения алгоритма идет проверка ключа подключения газовой турбины к регулированию мощности блока, если турбина подключена к регулированию, то задание формируется путем вычитания из заданной мощности РМБ текущей мощности и мощностей всех турбин (ГТ1, ГТ2, ПТ). Если к регулированию подключены обе турбины, то небаланс мощности делится между ними поровну.

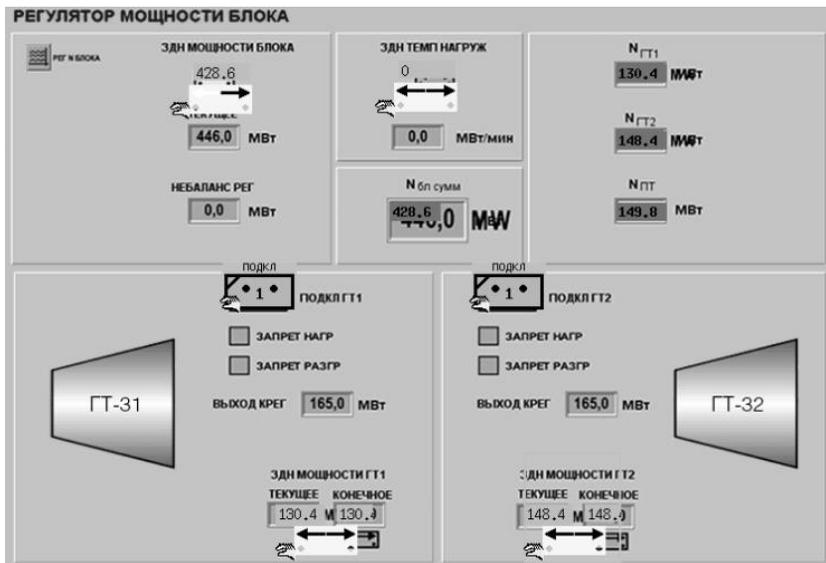


Рис. 3. Регулятор мощности блока, реализованный в тренажере

Если турбина не подключена к регулированию, то берется задание от локального задатчика мощности турбины. Также в схеме учтена возможность задания максимального темпа нагрузки каждой из турбин.

На данный момент в тренажере продолжается реализация всех систем автоматического регулирования и планируется проведение комплексных испытаний регулятора мощности энергоблока ПГУ-450.

Литература

1. **Рубашкин А.С., Рубашкин В.А.** Развитие технологии моделирования динамических процессов на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. – 2004. – № 10. – С. 40-43.
2. **Теория** и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн. 1. Проблемы и задачи / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 256 с.

Голубев Антон Владимирович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

Колесов Илья Александрович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

УДК 621.18:62.52

А.Н. НИКОНОРОВ, к.т.н., доцент;
В.А. ГОЛУБЕВ, студент

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

Особенности реализации подсистемы вибродиагностики турбины в структуре АСУТП турбогенератора

Аннотация. Рассматриваются особенности реализации системы вибродиагностики турбины в составе единой автоматизированной системы управления. Разработан интерфейс обмена данными между подсистемой вибродиагностики и контроллером. Реализованы алгоритмы идентификации состояния турбины.

Ключевые слова: вибродиагностика, турбина, автоматизированная система управления, идентификация, контроллер.

A.N. NIKONOROV, Candidate of Engineering, docent
V.A. GOLUBEV, master student

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

Features of realization of the subsystem of the turbine vibration diagnostics in the structure of turbogenerator APCS

Abstract. Discusses the features of the implementation system of the turbine vibration diagnostics as part of the unified automated control system. Developed a

data exchange interface between the vibration diagnostics system and the controller. Implemented algorithms for the identification of the state of the turbine.

Key words: vibration diagnostics, turbine, the automated control system, identification, controller.

Современные автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП) электростанций – это особый класс распределенных многообъектных многофункциональных иерархически построенных систем [1]. Однако часть функций контроля и управления зачастую выполняются в виде отдельных, обособленных подсистем. Так, например, вибродиагностика технологического оборудования реализуется на базе автоматизированных систем контроля вибрации и механических величин (АСКВМ) [2].

Авторами предпринята попытка объединить концепции АСУТП и АСКВМ за счет использования технологии OPC (Object linking and embedding for Process Control) в составе единой автоматизированной системы. Это позволяет получать более полную информацию о состоянии объекта управления, сократить издержки на внедрение системы и обучение персонала, а так же повысить качество управления за счет применения новых алгоритмов.

В общем случае подсистема вибродиагностики состоит из следующих компонентов:

- контрольно-измерительной аппаратуры;
- модулей устройств сопряжения и микроконтроллера, смонтированных в аппаратной стойке;
- автоматизированного рабочего места (АРМ) вибродиагностики;
- сервера архива;
- сервера OPC.

Перечень параметров, обязательных для контроля, установлен соответствующими нормативными актами. Кроме этого, в систему были добавлены дополнительные точки измерения и датчики, информационные сигналы которых участвуют в формировании полной информационной картины технического состояния турбоагрегата.

Выбор технических средств может определяться каждым заказчиком индивидуально, в соответствии с предъявляемыми технико-экономическими требованиями.

Программное обеспечение подсистемы вибродиагностики строится по модульному принципу. Каждый из модулей обладает своим функционалом. Так, например, OPC интерфейс обеспечивает обмен данными между контроллером и серверами. Роль шлюза играет OPC-сервер, на котором установлен «мост OPC». Программа, содержащая модуль графического интерфейса пользователя (GUI), блок быстрого преобразования Фурье и модуль с алгоритмами диагностики устанавливается на компьютере вибродиагностики. Такой подход позволяет

упростить процессы разработки и отладки, что, в конечном счете, сказывается на точности и скорости работы подсистемы.

Общая информационная схема разрабатываемой подсистемы представлена на рис. 1.

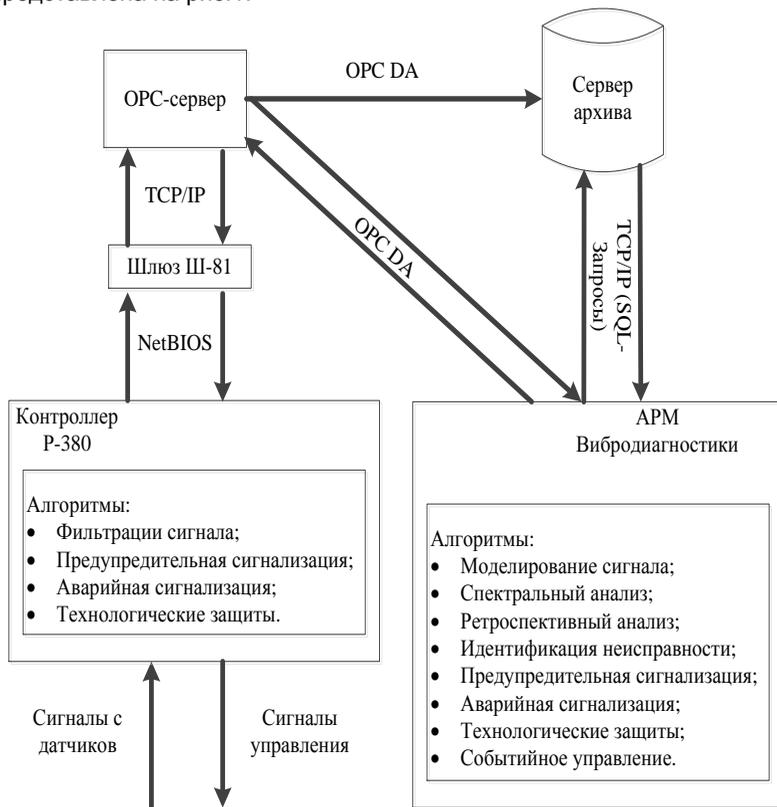


Рис. 1. Схема информационной структуры подсистемы вибродиагностики

Сигналы, несущие информацию с датчиков, поступают в микроконтроллер, где происходит их первичная фильтрация [3]. Здесь же реализованы предупредительная и аварийная сигнализации и технологические защиты – в случае превышения допустимых значений абсолютной и относительной вибрации по аварийной уставке происходит отключение турбоагрегата.

Обмен данными между контроллером и верхним уровнем подсистемы (АРМ Вибродиагностики и сервер архива) происходит через

ОПС-сервер. Он поставляется вместе с программно-техническим комплексом «Квинт СИ» [4].

На верхнем уровне находятся сервер архивной информации и АРМ вибродиагностики.

АРМ вибродиагностики включает в себя интерфейс обмена данными ОПС, алгоритмы моделирования процессов вибрации (на основе нейро-нечеткой модели), способные подстраиваться в режиме реального времени, алгоритмы защиты, следящие за скоростью изменения виброскорости и виброперемещения, графический интерфейс пользователя с графопостроителем, блок быстрого преобразования Фурье и алгоритмы диагностики (идентификации) состояния турбоагрегата [5].

Внедрение алгоритмов идентификации состояния позволяет автоматизировать процесс определения работоспособности оборудования. В случае обнаружения дефекта система передает его идентификационный номер в контроллер, который, в соответствие с таблицей дефектов, выполняет соответствующий защитный алгоритм. Чтобы исключить ложные срабатывания в подсистеме предусматривается верификация действий оперативным персоналом.

Использование подобной технологии позволяет увеличить количество информации о состоянии турбоагрегата, что, в свою очередь, дает возможность внедрить качественно новые алгоритмы управления. За счет этого повышается степень автоматизации объекта, увеличивается надежность оборудования и уменьшаются экономические затраты на обслуживание.

Литература

1. **Теория и технология** систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн. 1. Проблемы и задачи / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – Кн. 1 – 260 с.
2. **Гольдин, А.С.** Вибрация роторных машин: – 2-е изд. исправл. – М.: Машиностроение, 2000. – 344 с.
3. **Бокс, Дж.** Анализ временных рядов, прогноз и управление: Пер. с англ. / В 2 т., Т. 1. / Дж. Бокс, Г. Дженкинс; под ред. В.Ф. Писаренко. – М.: Мир, 1974. – 406 с.
4. **Программно-технический** комплекс Квинт СИ. Справочная система. ОАО «НИИТеплоприбор». – М.: 2012.
5. **Кондрашин, А.В.** Современные проблемы теории управления: электронное учебное пособие / А.В. Кондрашин – И., 2013.

Никоноров Андрей Николаевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

Голубев Владимир Алексеевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: uvikfive@gmail.com

УДК 621.311:628.16.001.57

А.В. АНДРЮШИН, д.т.н., профессор;
С.В. КИЕТ, к.т.н., доцент;
Е.И. МЕРЗЛИКИНА, к.т.н., доцент;
И.С. НИКИТИНА, к.т.н., доцент

Национальный Исследовательский Университет
Московский Энергетический Институт
111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14
E-mail: MerzlikinaYI@mpei.ru

Моделирование системы химико-технологического мониторинга водно-химического режима как учебная задача

Аннотация. Рассматривается моделирование автоматизированной СХТМ ВХР как учебная и исследовательская задача и реализация модели СХТМ на примере физической модели участка пароводяного тракта, оснащенного устройствами химического контроля «Техноприбор» с цифровым выходом.

Ключевые слова: химический контроль, моделирование, автоматизация.

A.V. Andriushin, Doctor of Engineering, professor, S.V. Kiet, Candidate of Engineering, docent, E.I. MERZLIKINA Candidate of Engineering, docent, I.S. Nikitina Candidate of Engineering, docent,

National Research University Moscow Power Engineering Institute
111250 Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14.
E-mail: MerzlikinaYI@mpei.ru

Simulation of the chemical monitoring system as an educational task

Abstract. Simulation of the automatic chemical monitoring system as an educational and research task is considered in this paper. The model of the monitoring system is developed on the basis of the physical water-steam circuit model equipped with chemical sensors made by “Technopribor” with the digital output.

Key words: chemical control, simulation, automation.

Сейчас в энергетике большое внимание уделяется вопросам энергосбережения, надежности, безопасности и экологичности работы оборудования. Перечисленные факторы напрямую зависят от качества теплоносителя, то есть, воды и пара, которое необходимо контролировать в режиме реального времени, в связи с чем широко внедряются автоматические системы химико-технологического мониторинга водно-химического режима (СХТМ ВХР). В настоящее время СХТМ ВХР рассматривают как подсистему АСУТП [1], в связи с чем возникает необходимость обучения студентов и специалистов в области автоматизации

устройству, принципам работы и обслуживанию приборов химического контроля, а также созданию на их основе СХТМ ВХР, обслуживанию и эксплуатации этой системы.

В связи с указанными выше причинами было принято решение создать учебно-экспериментальный стенд [2]. Кроме того, в настоящее время организуются лабораторные работы в режиме удаленного доступа, что обусловлено открытием в НИУ МЭИ отделения дистанционного обучения и актуальностью повышения квалификации специалистов без отрыва от производства.

Данный стенд оснащен современными устройствами химического контроля [3], все приборы установлены на панель с одной стороны, таким образом, студенты могут изучить устройство и принципы работы отдельных приборов. Стенд работает по замкнутому циклу и оснащен циркуляционным насосом, прокачивающим воду через систему трубопроводов. Для моделирования возникающих на производстве ситуаций есть возможность добавлять в воду различные реагенты.

С помощью этого стенда можно организовать как лабораторные работы по изучению отдельных устройств наподобие [4], так и выполнение студентами курсовых и дипломных работ, связанных с моделированием СХТМ ВХР, обращая внимание на организацию взаимодействия различных устройств и создание системы верхнего уровня.

Постановку задачи моделирования можно сформулировать следующим образом: необходимо с помощью имеющегося на стенде оборудования построить модель СХТМ ВХР, выполнив и предусмотрев следующее:

1. Программирование установленных на стенде микропроцессорных устройств представления информации для отдельных приборов химического контроля;

2. Объединение этих микропроцессорных устройств в сеть и организацию их взаимодействия по сети друг с другом и с контроллером (в настоящее время в качестве контроллера применяется ПЛК 154 производства фирмы Овен, обмен информацией осуществляется через интерфейс RS-485 по протоколу Modbus);

3. Настройку и программирования контроллера как устройства для сбора и обработки информации со всей системы нижнего уровня, в случае необходимости – также для выполнения функций управления. Для программирования контроллера в настоящее время используется пакет CODESYS, версия 2;

4. Создание с помощью средств пакета CODESYS операторского интерфейса и организацию архивирования полученной информации.

Пример схемы модели СХТМ ВХР показан на рис. 1.

В настоящее время для организации операторского интерфейса применяется система CODESYS, выбранная в силу своей простоты и доступности, а также имеющегося на кафедре значительного количе-

ства методических разработок по данной системе, например [5], и широкого внедрения ее в учебный процесс.

При выполнении моделирования также необходимо изучить и учесть ряд особенностей, присущих СХТМ ВХР. Например, в настоящее время ряд измерений все еще выполняется вручную с помощью лабораторных приборов. Таким образом, необходимо предусмотреть возможность ручного ввода данных, а также по возможности – проверку этих данных, чтобы максимально исключить влияние человеческого фактора. Проверка данных может выполняться как на наличие явных «ошибок ввода» - например, сообщение оператору о том, что введенное значение рН меньше нуля или больше четырнадцати, так и путем сравнения с ранее введенными или нормативными значениями, что, естественно, повышает достоверность полученных значений.

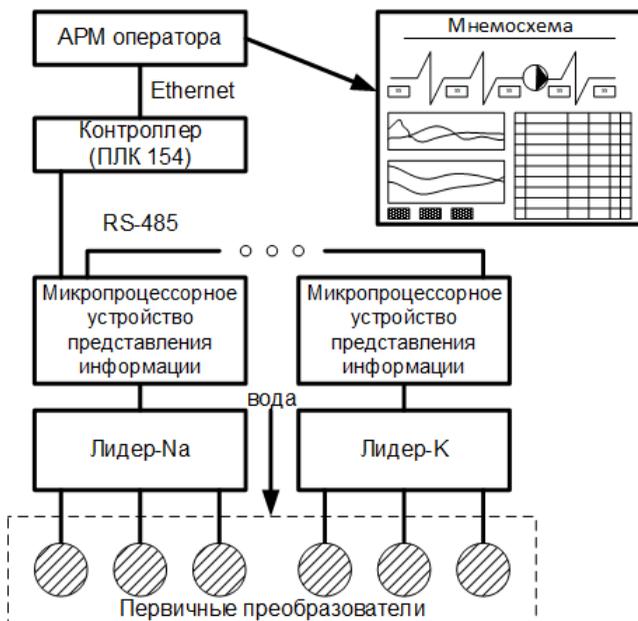


Рис. 1. Учебная модель СХТМ ВХР

Кроме этого, для значений полученных от промышленных приборов, также можно организовать диагностику полученной информации, что тоже можно рассматривать как элемент учебной задачи.

В настоящее время эта задача может решаться студентами только непосредственно в лаборатории, при этом решается вопрос о

возможности решения ее хотя бы частично в режиме удаленного доступа.

Решение описанной выше задачи, с одной стороны, расширяет и закрепляет знания в области устройства и эксплуатации приборов химического контроля и микропроцессорных средств представления информации (например, контроллеров и настенных сенсорных панелей). Кроме того, расширяются и закрепляются знания о программировании контроллеров, создании АРМ оператора, промышленных протоколах обмена информацией и т.д. И, наконец, студент приобретает, расширяет и закрепляет знания в крайне актуальной в настоящее время области, которой является создание и эксплуатация СТХМ ВХР.

Литература

1. **Егошина О.В.** Системы химико-технологического мониторинга: учебное пособие. – М.: Издательство МЭИ, 2013. – 48 с.
2. **Андрюшин А.В., Киет С.В., Мерзликина Е.И., Никитина И.С.** Экспериментально-обучающий стенд кафедры АСУТП НИУ МЭИ, оснащенный приборами химического контроля теплоносителя ТЭС и АЭС. Доклады БГУИР, №2, 2015, стр. 238-240.
3. **Киет В.Г., Киет С.В.** Разработки для решения задач пробоподготовки и контроля качества водного теплоносителя на АЭС. Доклады БГУИР, №2, 2015, стр. 90-93.
4. **Кузнецова А.В.** Изучение электродных кондуктометров. Лабораторная работа №17. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. – 8 с.
5. **Кузицин В.Ф., Мерзликина Е.И.** Методические указания по применению среды программирования CoDeSys для разработки программного обеспечения для контроллеров. – М.: Издательство МЭИ, 2013. – 32 с.

Андрюшин Александр Васильевич,

ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»,

e-mail: AndriushinAV@mpei.ru

Киет Станислав Викторович,

ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»,

e-mail: s.kiet@me.com

Мерзликина Елена Игоревна,

ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»,

e-mail: MerzlikinaYI@mpei.ru

Никитина Ирина Сергеевна,

ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»,

e-mail: NikitinaIS@mail.ru

УДК 681.536.6:697.3

Е.А. ПОЛУЭКТОВА, м.н.с.;
Н.А. ПОЛУЭКТОВА, м.н.с.

ОАО «ВТИ»
115280 г. Москва, ул. Автозаводская 14
E-mail: ekaterina_poluektova@mail.ru

Система автоматического управления отопительной схемы с элеватором

Аннотация. Рассмотрена отопительная схема с автоматизированным элеватором для регулирования подачи тепла на отопление зданий. Разработана система автоматического управления, включающая три взаимосвязанных регуляторов, отвечающих за поддержание температуры и давления воды, поступающей на отопление, в соответствии с температурным графиком и температурой наружного воздуха.

Ключевые слова: отопление, автоматическое регулирование, элеватор.

E.A. POLUEKTOVA, Junior Researcher,
N.A. POLUEKTOVA, Junior Researcher,

JSC "VTI"
115280 Moscow, Avtozavodskaya street, 14. *E-mail: ekaterina_poluektova@mail.ru*

Automated control system for a heating scheme with an elevator

Abstract. We review a heating scheme with an automatic elevator for regulating the heat used for heating buildings. We have worked out an automated control system with three interconnected regulators for sustaining the temperature and the pressure of the water supplied for heating in accordance with a temperature chart and outdoor temperature.

Key words: heating, automated regulation, elevator.

В настоящее время в России очень актуальным является вопрос о качественном регулировании тепла, отдаваемого в системы теплоснабжения. Существующие методы и средства регулирования отпуска тепла на отопление не в полной мере поддерживают баланс между требуемой тепловой нагрузкой и количеством отпускаемого тепла, что приводит к его перерасходам [1].

В ОАО «ВТИ» была разработана отопительная схема с автоматизированным элеватором [2] для регулирования подачи тепла на отопление зданий, обеспечивающая существенное повышение эффективности теплоснабжения. Схема прошла предварительную экспериментальную проверку и в настоящее время установлена на одном из тепловых пунктов 7-ого филиала ОАО «МОЭК» (предприятие №3), параллельно с действующей.

Сетевая (горячая) вода подается в систему отопления через клапан расхода (КР), за которым установлен элеватор, смешивающий

сетевую и обратную (холодную) воду, поступающую от потребителя. На линии подвода обратной воды к элеватору установлен клапан температуры (КТ) (см. рис. 1).

Основные задачи системы отопления заключаются в поддержании требуемого расхода воды и заданной температуры воды, (тепла, отдаваемого потребителю) в соответствии с температурным графиком отопления и температурой наружного воздуха [3].

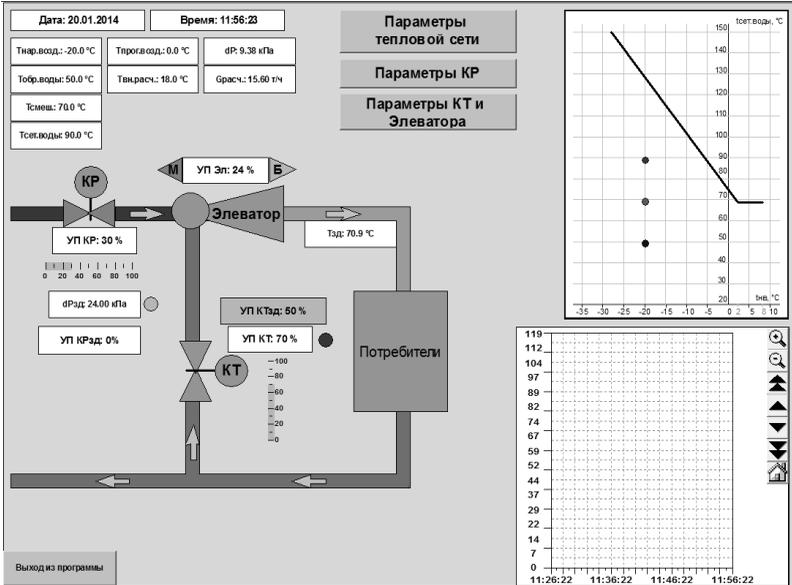


Рис. 1 Видеокادر системы управления

Для автоматического выполнения данных задач была разработана система автоматического управления (САУ), которая состоит из трех взаимосвязанных регуляторов, воздействующих на: КР, КТ и элеватор.

Регулятор расхода (РР) поддерживает заданное значение расхода воды в системе отопления в зависимости от изменения в ней перепада давлений, его регулирующим органом является КТ. Заданное значение РР определяется с учетом оптимальных параметров эксплуатации по заданному температурному графику. В РР предусмотрено ограничение, связанное с существенным повышением температуры наружного воздуха. В этом случае подаются команды на полное закрытие КР и полное открытие КТ (система отопления начинает работать в автономном режиме).

Регулирование температуры воды, подаваемой на обогрев потребителя, выполняется двумя регуляторами: основным (РТ-1), для него регулирующий орган – элеватор, и вспомогательным (РТ-2), для него регулирующий орган – КТ. Заданные значения для РТ-1 и РТ-2 определяются по температурному графику с учетом характера изменения температуры наружного воздуха и требуемого расхода воды. РТ-1 постоянно находится в работе, РТ-2 включается в работу, если основной регулятор не может самостоятельно поддерживать заданное значение температуры воды. Он работает в заданном регулировочном диапазоне, прямо пропорционально изменяя количество обратной воды, подаваемой на элеватор от потребителя. Если перепад давлений в системе отопления при работе РТ-2 начинает увеличиваться, независимо от положения РР срабатывает запрет на последующее открытие РТ-2.

Для анализа характера изменения температуры наружного воздуха в САУ реализован специальный алгоритм прогнозирования на основе динамической линейной модели, работающий постоянно. Алгоритм циклически анализирует изменение температуры наружного воздуха в течение заданного интервала времени и на основе полученных результатов вычисляет прогнозируемое изменение температуры на следующий временной интервал. Это значение передается в алгоблок определения задания РТ-1 и РТ-2.

Разработанная система автоматического управления реализована на отечественном оборудовании фирмы ОБЕН. В проекте были использованы программно-логический контроллер (ПЛК) 154-220, модуль аналогового ввода МВА8 и модуль дискретного вывода МВУ8 (управляющий модуль). Это оборудование было размещено в одном шкафу управления, который может быть расположен как в непосредственной близости от исполнительных механизмов системы распределения тепла, так и на некотором расстоянии от него.

Для работы персонала были разработаны и реализованы два варианта автоматизированного рабочего места (АРМ). АРМ-1 – стационарный (компактный), реализован на панели оператора ОБЕН СМ11, вмонтированной непосредственно в лицевую часть шкафа управления. АРМ-2 реализован на базе персонального компьютера, на дисплей которого выводится видеокадр управления (Рис. 1). Оба варианта АРМ отображают основные технологические параметры системы отопления и позволяют изменять регулирующие рабочие параметры системы в зависимости от конкретных характеристик теплового пункта. Нужно отметить, что на АРМ-2 информация о технологических изменениях в отопительной системе отображается более полно и оперативно, но для реализации этого варианта необходимо дополнительное оборудование (в частности, персональный компьютер).

Заключение

Разработанная ОАО «ВТИ» автоматизированная система отопления с элеватором позволяет повысить эффективность теплоснабже-

ния, обеспечивая более качественное поддержание баланса между требуемой тепловой нагрузкой и количеством отпускаемого тепла, сокращая перерасходы тепла.

Для анализа характера изменения температуры наружного воздуха в САУ реализован специальный алгоритм прогнозирования на основе динамической линейной модели.

Литература

1. **Байбаков С.А.** Анализ состояния систем отопления зданий при различных возмущающих воздействиях. Новости Теплоснабжения 2011, №7. – с. 21 – 25.
2. **Патент RU 97481, F 24 D 3/00, 2010.**
3. **Каленская М.К., Зорченко Н.В.** Результаты исследования схем регулирования отопительной нагрузки с элеваторным присоединением. Новости Теплоснабжения 2011, №7. – с. 26 – 28.

Полуэктова Екатерина Александровна,
ОАО «ВТИ»,
e_mail: ekaterina_poluektova@mail.ru
Полуэктова Надежда Александровна,
ОАО «ВТИ»

УДК 681.542.2:621.311.22

Е.А. ПОЛУЭКТОВА, м.н.с.

ОАО «ВТИ»
115280 г. Москва, ул. Автозаводская 14
E-mail: ekaterina_poluektova@mail.ru

Система автоматического управления процессами приготовления и дозирования химических растворов

Аннотация. Представлена автоматизированная комплексная установка, предназначенная для приготовления и дозирования растворов реагентов, используемых для поддержания водно-химических режимов. Разработаны алгоритмы логического управления основными технологическими процессами.

Ключевые слова: автоматизация, логическое управление, реагент.

Е.А. POLUEKTOVA, Junior Researcher
JSC "VTI"
115280 Moscow, Avtozavodskaya street, 14. E-mail: ekaterina_poluektova@mail.ru

Automated process control system for preparation and dosage of chemical solutions

Abstract. We present an automatic complex facility for preparation and dosage of reagent solutions for sustaining hydro chemical regimes. We have worked out the logic control algorithms for the main technological processes.

Key words: automation, logic control, reagent.

Для ведения водно-химического режима энергетического обслуживания с использованием различных реагентов, необходимых для коррекционной обработки теплоносителей, сотрудниками ОАО «ВТИ» была создана автоматизированная комплексная установка, предназначенная для приготовления и дозирования растворов реагентов.

Установка состоит из двух баков хранения, четырех баков приготовления с мешалками, двух насосов перекачки и четырех насосов-дозаторов. Исполнительные механизмы – электрифицированы, а характерные технологические узлы установки оснащены измерительными приборами и датчиками.

Автоматическое приготовление растворов реагентов в каждом баке приготовления осуществляется программой логического управления. Каждая программа - последовательность операторов IF (ЕС-ЛИ), при этом условия первого опрашиваются при выполнении последующих операторов. Когда условия оператора выполнены, соответствующие команды IF фиксируются RS-триггером и сбрасываются после выполнения последнего оператора.

Программа управляет всеми этапами приготовления (подачей реагента и обессоленной воды и их смешивание) путем формирования команд, поступающих на исполнительные механизмы. На рис. 1 представлены графики изменения технологических параметров в процессе приготовления.

Для контроля выполнения этапов используется сравнение уровня в баке, изменяющегося при подачи реагента или обессоленной воды, и время работы исполнительных механизмов с расчетными значениями. Так как при подаче жидкостей в бак возникают колебания, для сравнения в программе используется установившейся сигнал по уровню. Заданное значение уровня рассчитывается автоматически по начальным параметрам готовящегося раствора.

В программе реализован вариант отложенного запуска, выполняемого по признаку непрерывного дозирования раствора в соответствующий тракт.

В системе автоматического управления (САУ) реализованы технологические блокировки, в том числе от перелива жидкости в работающем баке и от работы насоса перекачки реагента на «сухую».

Дозирование приготовленного раствора в тракты котла выполняется одним из двух насосов-дозаторов, при этом можно менять производительность и время работы насоса.

Корректировка параметров дозирования раствора реагента выполняется по результатам анализа проб водно-химического режима энергетического объекта. В реализованной системе автоматического управления имеется возможность автоматического регули-

рования дозирования раствора по заданному значению химического параметра тракта, например, рН в характерной точке.

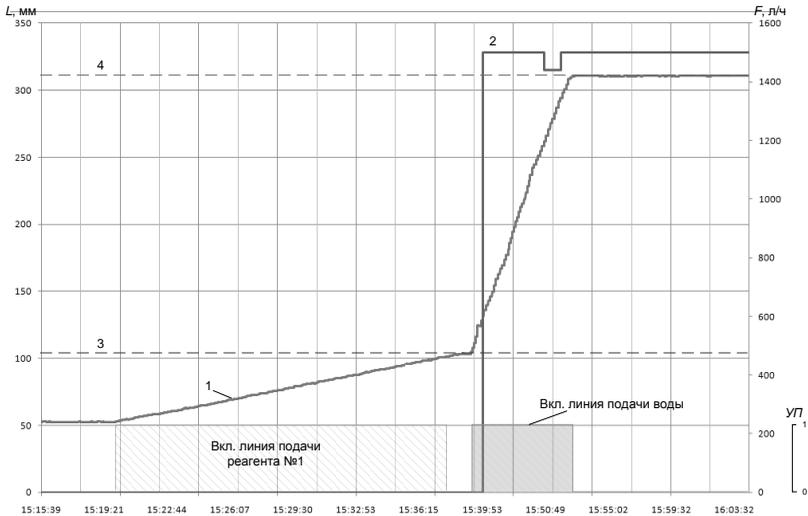


Рис. 1. Изменения уровня в баке, расхода обессоленной воды и линий подачи жидкостей в бак при приготовление раствора на основе реагента №1:
 1 – Уровень в баке приготовления, 2 – Расход обессоленной воды,
 3 – Заданное значение уровня реагента,
 4 – Заданное значение уровня обессоленной воды.

Непрерывное дозирование обеспечивается за счёт наличия в САУ автоматически выполняемых функций:

- включения резерва,
- перехода от пустого бака приготовления к заполненному (без отключения насосов-дозаторов),
- приготовления раствора реагента в пустом баке (отложенный запуск программы приготовления).

Автоматическое включение резерва (АВР) реализовано для случаев, когда в процессе дозирования раствора работающий насос-дозатор неисправен или давление на его напоре превысило допустимое значение. АВР не срабатывает, если давление на общей линии подачи раствора в тракт котла превысило допустимое значение или баки приготовления соответствующего тракта пусты.

Автоматический переход к резервному баку начинается, когда уровень в используемом баке становится равным 0, а в резервном есть раствор. Переход осуществляется с задержкой для полного опустошения бака (с учетом конусообразного дна баков). После включения

в работу резервного бака завершается подача раствора реагента из использовавшегося ранее.

САУ реализована на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) 110-60 ОВЕН, с применением 2-х модулей ОВЕН МВА8, 3-х модулей ОВЕН МДВВ и 8-ми преобразователей вращения (ПЧВ) для управления электроприводами насосов-дозаторов и мешалок.

Модули ввода/вывода, ПЧВ и ПЛК взаимодействуют, используя два независимых интерфейса. Также при реализации проекта было предусмотрено компактное автоматизированное рабочее место (АРМ) персонала.

Заключение

Сотрудниками ОАО «ВТИ» была разработана САУ комплексной установки приготовления и дозирования раствора с применением двух типов реагентов в две независимые точки конденсатно-питательного и пароводяного трактов котла. Установка, оснащённая САУ, прошла опытную эксплуатацию.

Программы логического управления, реализованные в составе САУ, позволяют выполнять процессы приготовления и дозирования растворов реагентов автоматически, обеспечивая надежное и качественное поддержание основных параметров водно-химического режима энергетического оборудования в требуемых диапазонах.

Полуэктова Екатерина Александровна,
ОАО «ВТИ»,
e_mail: ekaterina_poluektova@mail.ru

УДК 681.5

И.А. СТЕПИН, инженер

ОАО «ВТИ»
115280 г. Москва, ул. Автозаводская 14
E-mail: oao@vti.ru

Использование протоколов шифрования в SCADA-системах

Аннотация. Рассмотрены типы протоколов шифрования в SCADA-системах. Приведены преимущества и недостатки открытых и закрытых систем.

Ключевые слова: безопасность, протокол, SCADA-системы.

I.A. STEPIN, Engineer

ОАО «ВТИ»
115280 Moscow, Avtozavodskaya St., 14. E-mail: oao@vti.ru

Using encryption protocol in SCADA-systems

Abstract. The types of encryption protocols in SCADA-systems. The advantages and disadvantages of open and closed systems.

Key words: security, protocol, SCADA-systems.

На сегодняшний момент на рынке SCADA-систем (Supervisory Control and Data Acquisition) – системах диспетчерского управления и сбора данных – представлены как системы с открытым исходным кодом (open-source), так и закрытые системы.

Рассмотрим основные преимущества и недостатки систем с открытым исходным кодом и закрытых SCADA-систем, представленные в таблице.

Таблица.

Тип SCADA	Преимущества	Недостатки
Системы с открытым исходным кодом	- возможность гибкой настройки системы; - совместимость с большим количеством приборов;	- сложность в настройке; - узкий (небольшой) выбор;
Закрытые системы	- широкий выбор; - наличие технической поддержки;	-отсутствие возможности внесения оперативных изменений в систему

Системы с открытым исходным кодом

Преимущества:

1) Открытый код системы позволяет разработчику более гибко настраивать систему, добавлять свои части кода, находить недочеты в уже написанном коде.

2) Совместимость с большим количеством приборов. Это также связано с открытостью кода системы. Разработчик может сам написать для своего проекта дополнительный модуль, отвечающий за определенный прибор.

Недостатки:

1) Узкий (небольшой) выбор систем ограничивает их применение. Системы с открытым исходным кодом обычно используются для более простых технических решений.

2) Сложность настройки. Системы с открытым исходным кодом обычно используют компании, имеющие собственного программиста.

Закрытые системы

Преимущества:

1) Широкий выбор закрытых систем связан, прежде всего, с тем, что большинство компаний, разрабатывающих SCADA-системы, предпочитают закрытость своих проектов ввиду интеллектуальной собственности. Поэтому, как правило, каждая крупная компания для нового проекта создает отдельную SCADA-систему.

2) Техническая поддержка. В сложных ситуациях покупатель (пользователь) может обратиться к разработчику системы за помощью.

Недостатки:

1) Полностью закрытый код не дает гибкости настройки и не позволяет самостоятельно устранить выявленные ошибки.

Отдельно стоит рассмотреть затраты на системы с открытым исходным кодом и закрытые системы. Учитывая все преимущества и недостатки, можно сделать вывод, что использование закрытых систем будет предполагать большие затраты, ввиду стоимости самой системы, ее установки, наличия технической поддержки и предоставляемой гарантии.

На современном этапе развития SCADA-систем для их полноценной работы необходимо построение распределенных промышленных сетей с использованием различных протоколов передачи данных.

Одним из протоколов, обеспечивающих более безопасное использование при удаленных соединениях в SCADA-системах, является протокол шифрования SSL(Secure Socket Layers).

Если рассмотреть всю классификацию сетевых протоколов, соответствующую теоретической модели OSI (Open Systems Interconnection Basic Reference Model) – базовая эталонная модель взаимодействия открытых систем,- то использование SSL протокола осуществляется на сеансовом уровне, который отвечает за создание и закрытие сеанса связи между устройствами, обменивающимися информацией.

Протокол безопасности SSL позволяет передавать зашифрованную информацию по открытым каналам связи, обеспечивая надежный обмен между двумя устройствами, работающими удаленно. Протокол состоит из нескольких слоев. Первый слой – это транспортный протокол TCP (Transmission Control Protocol), который обеспечивает формирование пакета и непосредственную передачу данных по сети. Второй слой – это защитный SSL Record Protocol. При защищенной передаче данных эти два слоя являются обязательными, формируя некое ядро SSL, на которое в дальнейшем накладываются другие слои. Для шифрования данных используются криптографические ключи различной степени сложности. Для передачи данных с помощью SSL на сервере необходимо наличие SSL-сертификата, который содержит сведения о владельце ключа, центре сертификации, данные об открытом ключе и т.д. Протокол широко используется для обмена данными в сети Интернет, а так же в промышленных сетях с удаленным доступом.

Наиболее распространенной реализацией протокола SSL является криптографический пакет OpenSSL. Он используется в SCADA-системах с открытым исходным кодом. Ввиду событий, связанных с обнаруженной в одной из версий OpenSSL ошибкой¹, позволяющей получить доступ к внутренней информации, возникает вопрос целесообразности использования данного протокола. Заменой данному протоколу может служить протокол TLS, который является модифицированной версией одной из последних версий SSL.

¹ <http://ru.wikipedia.org/wiki/Heartbleed>

Одним из главных критериев при выборе типа системы должно быть обеспечение безопасности при использовании той или иной системы. На основании изложенного выше, можно сделать вывод, что системы с открытым исходным кодом не гарантируют безопасность, но позволяют ее проверить сообществом пользователей. С другой стороны, разработчики закрытых систем предоставляют гарантию безопасности, берут ответственность за исправление найденных ошибок на себя и стараются исправлять эти ошибки в кратчайшие сроки. Но в любом случае, как в открытых системах, так и в закрытых, разработчики отдельных компонентов системы, в том числе, таких как криптографический пакет OpenSSL, должны своевременно сообщать о каких-либо выявленных ошибках.

Степин Илья Алексеевич,
ОАО «Всероссийский теплотехнический институт»,
e-mail: work.stepin@gmail.com

УДК 621.18-5

А.В. ГОЛУБЕВ, к.т.н., доцент,
К.О. ЕГОРОВА, магистрант

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

Разработка ФГУ вентиляцией топки котла при пуске

Аннотация. Реализована часть системы автоматизированного пуска котла - пошаговое логическое управление вентиляцией топки. Выявлены ошибки и произведена отладка алгоритма управления в системе тренажерного комплекса. Проведены испытания пуска вентиляцией топки.

Ключевые слова: тренажерный комплекс, функционально-групповое управление, автоматизированный пуск, пусковой режим.

A.V. GOLUBEV, Candidate of Engineering, docent,
K.O. EGOROVA, master student
Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34
E-mail: kafsu@su.ispu.ru

Development of functional-group control ventilation of the combustion chamber at start-up

Abstract. A part of the system of automated start-up of the boiler is implemented, that is step-by-step logic control system of ventilation of the combustion chamber. The errors are identified and debugging of the control algorithm in the system of the training complex is carried out. The tests of start-up of ventilation of the combustion chamber is carried out.

Key words: training complex, functional-group control, automated start-up, start-up mode.

В пусковых режимах энергоблока оператору приходится контролировать большое число параметров и показателей состояния оборудования. Это чрезвычайно затрудняет работу оператора, неизбежно снижает качество эксплуатации и, как следствие, эксплуатационную надежность оборудования [1].

Потенциал реализации задач в современных ПТК практически неограничен, что позволяет успешно реализовывать все типовые и часть сложных функций, в том числе автоматизированный пуск. Однако реализация системы пуска в современных АСУТП на реальном оборудовании затруднительна и связана с многочисленными испытаниями.

В рамках поставленной задачи исследуется возможность использования полигонов АСУТП с имитационными моделями технологического оборудования, разработанных на основе тренажера и функционирующих в режиме реального времени [2], для моделирования процесса автоматизированного пуска.

Основой для разработки системы автоматизированного пуска являются типовые функции такие, как дистанционное управление, автоматическое регулирование и технологические защиты. Таким образом, на первом этапе для реализации таких функций полигон АСУТП должен быть максимально приближен к реальному блоку как по модели АСУТП, так и по составу реализованных функций.

Поставленная задача рассматривается на примере тренажерного комплекса энергоблока 250 МВт ТЭЦ-25 ОАО «Мосэнерго» [3].

Каждая функция является аналогом функций ПТК контроллерного уровня и информационно-вычислительного комплекса. Тем самым можно сказать, что модель АСУТП приближена к ее реализации на реальном энергоблоке.

Основным этапом является непосредственно реализация системы автоматизированного пуска, основывающаяся на функции функционально-группового управления (ФГУ). Функционально-групповое управление осуществляет координированное пошаговое логическое управление отдельными технологически связанными функциональными группами оборудования, агрегатами и энергоблоками в целом.

Система ФГУ строится по иерархическому принципу и включает: верхний уровень - координирующее устройство; уровень управления отдельными функциональными группами/подгруппами; нижний уровень управления исполнительными устройствами, автоматическими регуляторами и программаторами [4].

Автоматизация дискретного или логического управления предусматривает автоматизированное воздействие в заданной технологической последовательности на объекты управления с дискретным изме-

нением состояния (открытие/закрытие запорной арматуры, включение/отключение механизмов и регуляторов и т. д.).

Система автоматизированного пуска котла представляет собой иерархию взаимодействия определенных пошаговых программ:

- пуска дымососа (ДС), дутьевого вентилятора (ДВ), ДРГ;
- вентиляции топки котла;
- продувки и опрессовки газопроводов котла;
- растопки котла.

Пример блок-схемы реализации пошагового логического управления вентиляцией топки котла в укрупненном виде изображен на рис. 1. На ней представлены основные этапы шаговой программы, такие как управление арматурой, проверка необходимых условий и установка заданий регулятору.

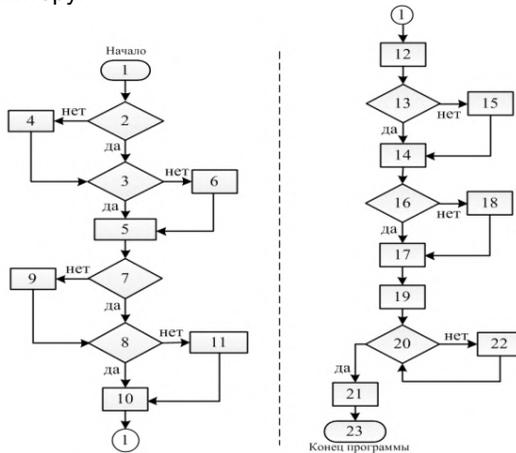


Рис. 1. Блок-схема пошагового управления вентиляцией котла:

- | | |
|--|--|
| 1 - открыты клапаны горячего воздуха к горелкам; | 12 - задание разрежения (-6 кс/м ²); |
| 2 - проверка работы ДС-А; | 13 - проверка работы ДРГ-А; |
| 3 - проверка работы ДВ-А; | 14 - открытие НАДРГ-А; |
| 4 - ФГУ пуска ДС-А в работе; | 15 - ФГУ пуска ДРГ-А в работе; |
| 5 - открытие НАДВ-А; | 16 - проверка работы ДРГ-Б; |
| 6 - ФГУ пуска ДВ-А в работе; | 17 - открытие НАДРГ-Б; |
| 7 - проверка работы ДС-Б; | 18 - ФГУ пуска ДРГ-Б в работе; |
| 8 - проверка работы ДВ-Б; | 19 - сигнал начала вентиляции топки; |
| 9 - ФГУ пуска ДС-Б в работе; | 20 - контроль условий вентиляции; |
| 10 - открытие НАДВ-Б; | 21 - задание разрежения (-4 кс/м ²); |
| 11 - ФГУ пуска ДВ-Б в работе; | 22 - сигнал о нарушении вентиляции; |
| | 23 - конец программы. |

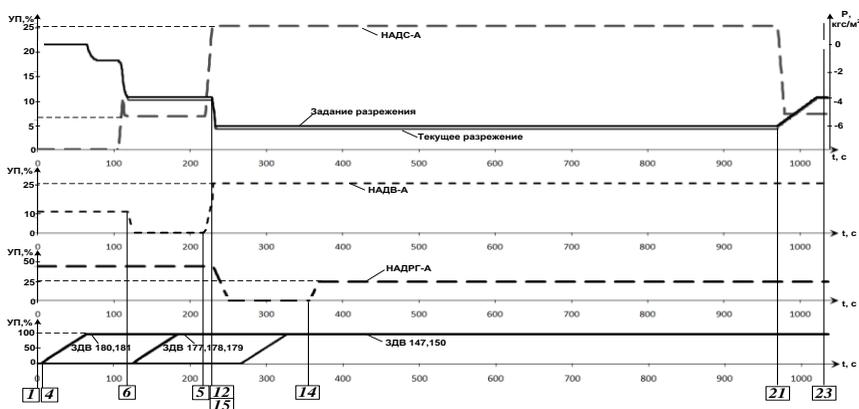


Рис. 2. График работы шаговой программы

На рис. 2 отражена последовательность шагов программы вентиляции топки на примере управления задвижками на газо-воздушного тракта, направляющими аппаратами ДС, ДВ и ДРГ, регулятором разрежения. Тонкой сплошной линией отмечены переходы программы на определенный шаг.

При автоматизации пусковых режимов наиболее сложными этапами являются алгоритмическая реализация программ ФГУ и выявление ошибок. Включение реализации системы автоматизированного пуска в последовательность работ в общей технологии создания АСУТП [5] с использованием полигонов с имитационными моделями на основе тренажера позволит частично избежать рисков возникновения аварийных ситуаций на реальном оборудовании в процессе отладки алгоритмов пуска.

Литература

1. **Голубев А.В.** Особенности отладки и испытаний алгоритмов автоматического управления нестационарными режимами работы энергоблоков // Вестник ИГЭУ. – 2010. – № 4. – С. 69 – 71.
2. **Тверской Ю.С.,** Голубев А.В., Никоноров А.Н. Полигон АСУТП электростанций - эффективное средство подготовки специалистов и тестирования сложных систем управления // Теплоэнергетика. -2011.- №10.-С.70-75.
3. **Рубашкин А.С.,** Рубашкин В.А. Развитие технологии моделирования динамических процессов на тепловых электростанциях // Теплоэнергетика. – 2004. – № 10. – С. 40-43.
4. **Невзгодин В.С.** Разработка и освоение пошаговой логики пуска энергоблока ПГУ-450 на базе ОАО «Северо-Западная ТЭЦ»: дис. канд. техн. наук: 05.13.06 / Невзгодин Вячеслав Сергеевич. – М., 2008. – 179 с.
5. **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; ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2013. – 208 с.

Голубев Антон Владимирович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

Егорова Ксения Олеговна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kse290792@gmail.com

УДК 621.311.22.001.5

Е.И. МЕРЗЛИКИНА, к.т.н., доцент;
Т.Е.ЩЕДЕРКИНА, к.т.н., доцент

Национальный исследовательский университет
Московский энергетический институт
111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14
E-mail: MerzlikinaYI@mpei.ru

Оптимизация распределения тепловой и электрической нагрузки по энергоблокам ТЭЦ с помощью генетического алгоритма

Аннотация. Рассмотрено решение задачи оптимизации распределения тепловой и электрической нагрузки между параллельно работающими энергоблоками ТЭЦ с помощью метода генетических алгоритмов. Показано влияние числа поколений на разброс значений целевой функции на примере ТЭЦ с тремя энергоблоками.

Ключевые слова: оптимизация, генетический алгоритм.

E.I. MERZLIKINA, Candidate of Engineering, docent,
T.E. SHCHEDERKINA, Candidate of Engineering, docent,

National Research University Moscow Power Engineering Institute
111250 Moscow, Krasnokazarmennaya St., 14. *E-mail: MerzlikinaYI@mpei.ru*

Optimal distribution of heat and electrical load between the units of a cogeneration power plant by means of genetic algorithm

Abstract. The optimal distribution of heat and electrical load between units of a cogeneration power plant by means of the genetic algorithm method is considered in this paper. The influence of the generation number on the variance of the criterion function values is shown, a cogeneration plant with three units is taken as an example.

Key words: optimization, genetic algorithm.

Генетический алгоритм (ГА) – метод оптимизации, основанный на моделировании естественного отбора. Его описания приводятся,

например, в [1]. ГА и его модификации применяются для решения ряда задач, например, расчета настроек различных АСР [2].

Рассмотрим применение ГА для оптимизации распределения тепловой и электрической нагрузки между блоками ТЭЦ для минимизации суммарного расхода топлива. Для решения этой задачи традиционно применяется метод неопределенных множителей Лагранжа, также можно использовать метод динамического программирования [3]. Эти методы имеют ряд недостатков (например, для метода Лагранжа - жесткие требования к виду и представлению расходных характеристик (РХ) блоков), которых нет у ГА.

Постановка задачи: нужно распределить заданную электрическую и тепловую нагрузку между n энергоблоками ТЭЦ так, чтобы суммарный расход топлива был минимален, и выполнялись наложенные ограничения. Функция цели (функция приспособленности) имеет вид:

$$B_{T\Sigma} = \sum_{i=1}^n B_{Ti} , \quad (1)$$

где B_{Ti} - расход топлива на i -ый блок; $B_{T\Sigma}$ - суммарный расход топлива. Расход топлива на каждый блок зависит только от его нагрузок и не зависит от нагрузок других блоков, то есть,

$$B_{Ti} = B_{Ti}(N_i, Q_i) , \quad (2)$$

где N_i - мощность i -го блока; Q_i - его тепловая нагрузка. РХ блоков описываются полиномами второго порядка. Суммарная электрическая нагрузка станции должна быть равна заданной:

$$N_{disp} = \sum_{i=1}^n N_i , \quad (3)$$

где N_{disp} - заданная суммарная мощность; кроме того, электрическая мощность каждого блока должна лежать в определенном диапазоне:

$$N_{\min,i} \leq N_i \leq N_{\max,i} . \quad (4)$$

Аналогичные ограничения накладываются на тепловую нагрузку:

$$Q_{disp} = \sum_{i=1}^n Q_i , \quad (5)$$

где Q_{disp} - суммарная заданная тепловая нагрузка;

$$Q_{\min,i} \leq Q_i \leq Q_{\max,i} . \quad (6)$$

Для данного случая особи (хромосомы) – это варианты распределения нагрузки; они состоят из генов, каждый ген – это электрическая

или тепловая нагрузка блока. Нагрузки последнего блока вычисляются, чтобы выполнялись (3) и (5):

$$N_n = N_{\text{disp}} - \sum_{i=1}^{n-1} N_i ; \quad (7)$$

$$Q_n = Q_{\text{disp}} - \sum_{i=1}^{n-1} Q_i . \quad (8)$$

Существуют генетические операторы скрещивания и мутации, здесь применяется оператор одноточечного скрещивания. Точка скрещивания выбирается случайным образом, все гены первого родителя до этой точки достаются первому потомку, все гены после – второму. Со вторым родителем происходит наоборот. Из двух полученных потомков в популяцию вносят самого приспособленного. На каждом цикле алгоритма из популяции исключают 10% наименее приспособленных особей, чье место занимают потомки, и создается новая популяция. Затем проверяется условие остановки ГА, если оно выполнено, отбирается наиболее приспособленная особь (то есть, решение, минимизирующее целевую функцию).

Существуют различные условия остановки работы ГА, например, если пройдено заданное число поколений, или если значения целевой функции на соседних шагах отличаются не более чем на определенную небольшую величину. При современных возможностях вычислительной техники увеличение количества поколений не сказывается заметно на скорости расчетов.

ГА удобен для данной задачи, так как при увеличении её размерности усложнения алгоритма не происходит, изменяется лишь количество генов в каждой хромосоме. Так как набор исходной популяции выполняется случайным образом, полученное решение также носит вероятностный характер. С увеличением числа поколений уменьшается разброс вариантов решения.

В качестве примера рассмотрим распределение по трем блокам ТЭЦ электрической нагрузки 180 МВт и тепловой нагрузки 300 ГКал/час. При равномерном распределении мощность каждого блока 60 МВт, тепловая нагрузка – 100 ГКал/час, суммарный расход топлива 70,237 т.у.т/час, что существенно превышает расход топлива при распределении, полученном с помощью ГА. Результаты расчетов для пяти поколений приводятся в табл. 1, для 100 поколений – в табл. 2. Как видно из приведенных значений, при увеличении числа поколений уменьшается разброс значений целевой функции.

Таблица 1. **Распределение для пяти поколений**

№	1	2	3	4	5
N_1 , МВт	80	79	68	73	76
Q_1 , ГКал/час	117	114	95	104	107
N_2 , МВт	50	50	58	50	54
Q_2 , ГКал/час	110	70	85	76	119
N_3 , МВт	50	51	54	57	50
Q_3 , ГКал/час	73	116	120	120	74
$V_{опт}$, тунт/час	67,0103	67,3222	67,2133	67,0937	67,1257

Таблица 2. **Распределение для ста поколений**

№	1	2	3	4	5
N_1 , МВт	80	80	80	79	80
Q_1 , ГКал/час	119	115	114	111	114
N_2 , МВт	50	50	50	50	50
Q_2 , ГКал/час	110	110	110	110	114
N_3 , МВт	50	50	50	51	50
Q_3 , ГКал/час	71	70	76	79	72
$V_{опт}$, тунт/час	67,0412	67,0186	67,0373	67,1333	66,9348

ГА эффективен для решения задачи оптимизации распределения нагрузок по энергоблокам, так как он обладает рядом достоинств - не усложняется при увеличении задачи, кроме того, не накладываются никакие ограничения на вид РХ блоков. Полученное решение носит вероятностный характер, но, как показывают расчеты, заметный эффект от оптимизации за расчетный период (например, за месяц) достигается.

Литература

1. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы.. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. – 452 с.
2. Сабанин В. Р., Смирнов Н. И., Репин А. И. Модифицированный генетический алгоритм для задач оптимизации в управлении. – М.: МЭИ, 2005.
3. Щедеркина Т.Е., Мерзликина Е.И. Учет неопределенности исходных данных при решении задач статической оптимизации // Вестник МЭИ. – 2006. – № 3. – С. 22-28.

Мерзликина Елена Игоревна,
ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»,
e-mail: MerzlikinaYI@mpei.ru
Щедеркина Татьяна Евгеньевна,
ФГБОУ ВПО «НИУ «МЭИ»,
e-mail: shchte@mail.ru

УДК 681.586.67

Е.Д. МАРШАЛОВ, к.т.н., доцент

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

Исследование динамических характеристик термопреобразователей сопротивления

Аннотация. Получены переходные характеристики для термопреобразователей сопротивления при различных изменениях температуры. В результате обработки переходных характеристик рассчитаны их оценки. Показано влияние диаметра монтажной части термопреобразователей сопротивления на динамические характеристики датчиков температуры.

Ключевые слова: термопреобразователь сопротивления, динамические характеристики, калибратор температуры.

E.D. MARSHALOV, Candidate of Engineering, docent

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

Research of dynamic characteristics of resistance thermometers

Abstract. Obtained for the transient response of resistance thermometers at various temperature changes. The processing of the transfer characteristics calculated evaluation. Shows the influence of the diameter of the mounting part of resistance thermometers on the dynamic characteristics of temperature sensors.

Key words: resistance thermometer, dynamic characteristics, temperature calibrator.

В настоящее время автоматизация применяется в подавляющем большинстве технологических процессов. При эксплуатации современных АСУТП важное значение имеют точность и качество выполненных измерений [1, 2]. Значения величин должны постоянно обновляться и бесперебойно поступать на приборы для дальнейшей обработки. Самыми распространенными являются температурные измерения [3].

Существует огромное множество технических средств для измерения температуры, отличающихся принципом действия, диапазоном измерений, условиями эксплуатации, конструкцией, возможностью дистанционной передачи показаний и т.п. Однако можно выделить и общие показатели, применимые к большинству датчиков температуры, такие как класс допуска (характеризующий точность измерений) и время термической реакции (характеризующее быстродействие датчика).

Определение погрешности датчиков температуры, являющейся статической характеристикой – штатная процедура, регулярная в рамках метрологического обеспечения для технологических объектов управления. К тому же вопросы поверки датчиков давно изучены и широко известны.

По-другому обстоят дела с определением динамических свойств датчиков температуры. В каталогах и паспортах для датчиков температуры приводят лишь время термической реакции, зачастую не указывая даже среду, для которой представлена данная величина. Очевидно, что на динамические свойства будут оказывать влияние, как минимум, характеристика среды и скорость обтекания датчика технологической средой. Динамические свойства датчиков оказывают влияние на параметры настройки автоматических регуляторов и, соответственно, на качество работы АСУТП в целом.

Целью представленной работы является исследование датчиков температуры и определение их динамических характеристик.

Работа выполнена в лаборатории технологических измерений и метрологического обеспечения кафедры систем управления ИГЭУ. Наиболее распространенными в промышленности датчиками температуры являются термопреобразователи сопротивления. В представленной работе использовались платиновые термопреобразователи сопротивления (ТС) с номинальной статической характеристикой 100П, обеспечивающие высокую точность измерений [4]. Основные характеристики датчиков представлены в табл. 1.

Таблица 1. Основные характеристики ТС

Наименование	Заводской номер	Длина монтажной части, мм	Диаметр монтажной части, мм	Диапазон измерений температуры, °С
ТС-1388/5	№10300	250	4	-50...+250
ТС-1388/5	№10295	250	6	-50...+350
ТС-1088/5	№6780	320	8	-50...+350
ТС-1088/2	№6783	500	10	-50...+350

Для создания температуры использован сухоблочный калибратор температуры погружного типа ЭЛЕМЕР-КТ-650, позволяющий воспроизводить температуру в диапазоне от +50 до +650 °С [5]. Предел допускаемой основной абсолютной погрешности воспроизведения температуры калибратора составляет $\pm 0,08$ °С.

Для отображения и регистрации полученных значений температуры был использован многоканальный технологический регистратор РМТ-59, предназначенный для измерения, регистрации и контроля температуры и других неэлектрических величин, преобразованных в электрические сигналы силы и напряжения постоянного тока или активного сопротивления [6]. При подключении датчиков к измерительному прибору применена трехпроводная схема подключения для компенсации влияния температуры окружающей среды. Предел допускаемой

основной приведенной погрешности прибора составляет $\pm 0,2\%$. Периодичность записи данных при регистрации температуры составила 1 секунду.

Эксперименты проводились по следующей методике. Вначале термопреобразователи сопротивления подключались к входам АЦП регистратора РМТ-59 и размещались на лабораторном столе. Затем РМТ-59 посредством экранного меню был настроен для работы с нужными первичными измерительными преобразователями. На экране регистратора отображались текущие значения измеряемой температуры в виде чисел, графиков и гистограмм одновременно.

На калибраторе температуры КТ-650 задавалось требуемое значение температуры. Эксперименты проводились при следующих значениях температуры: 50, 100, 150, 200, 250, 300 и 350 °С. Исключение составил только термопреобразователь сопротивления ТС-1388/5 с диаметром монтажной части 4 мм, для которого не проводились измерения при 300 и 350 °С, ввиду того, что его верхний предел диапазона измерений составляет 250 °С. Далее производилось ожидание выхода КТ-650 на рабочий режим (20–30 мин.).

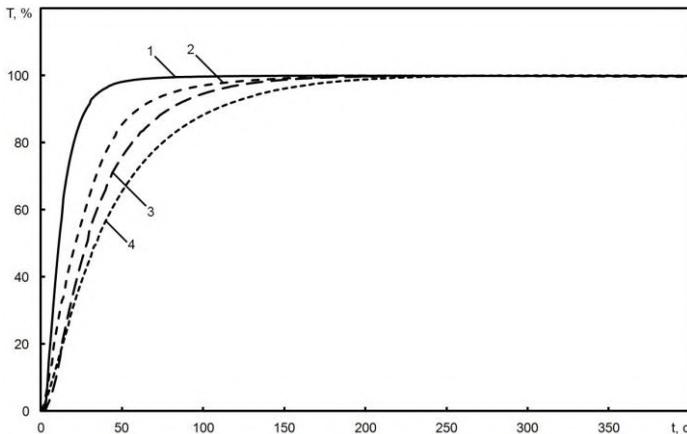


Рис. 1. Динамические характеристики датчиков температуры для диаметров монтажной части: 1 – 4 мм; 2 – 6 мм; 3 – 8 мм; 4 – 10 мм

После этого датчик температуры помещался в калибратор температуры КТ-650 и фиксировалось время начала переходного процесса с точностью до одной секунды. На экране РМТ-59 отображались переходные процессы значения температуры в каждый момент времени.

Для каждого значения температуры проводилось по 5 экспериментов. Оценки переходных характеристик получены путем применения методики совмещения кривых разгона по «нулевым линиям» в специа-

лизированном программном комплексе «Тренд». Построение интервальных оценок точности (границ доверительных интервалов) выполнено для заданной доверительной вероятности 0,95. Полученные результаты представлены на рис. 1.

Выводы.

1. Получены переходные характеристики для 4 термопреобразователей сопротивления при различных изменениях температуры.
2. В результате обработки полученных 130 переходных характеристик рассчитаны их оценки для доверительной вероятности 0,95.
3. Показано, что диаметр монтажной части термопреобразователей сопротивления оказывает большое влияние на динамические характеристики датчиков температуры.

Литература

1. **Теория и технология** систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн. 2. Проектирование / Под общей ред. Ю.С. Тверского; ФГБОУВПО «ИГЭУ им. В.И. Ленина». – Иваново, 2013. Кн. 2 – 436 с.
2. **Сергеев А.Г.**, Латышев М.В., Терегеря В.В. Метрология, стандартизация, сертификация. М.: Логос. 2003.
3. **Иванова Г.М.** Теплотехнические измерения и приборы. М.: Издательство МЭИ. 2005.
4. **Термометры** сопротивления. Паспорт. – М.: ООО НПП «Элемер», 2009. – 4 с.
5. **Калибратор** температуры КТ-650. Руководство по эксплуатации. – М.: ООО НПП «Элемер», 2009. – 108 с.
6. **Регистратор** многоканальный технологический РМТ-59. Руководство по эксплуатации. – М.: ООО НПП «Элемер», 2009. – 137 с.

Маршалов Евгений Дмитриевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: edm@su.ispu.ru

УДК 676:62-5

В.Н. СУРИКОВ, к.т.н., профессор;
Ю.А. ТОТУХОВ, к.т.н., доцент;
И.В. АНТОНИШИН, аспирант; А.В. ГРИЩЕНКО, аспирант

Санкт-Петербургский государственный технологический университет
растительных полимеров
198095, г. Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных 4
E-mail: antonishinivan@gmail.com

Выбор регулирующего органа системы автоматического управления с учетом экономии энергии в гидравлической сети

Аннотация. Исследованы зависимости потерь затрачиваемой энергии от степени открытия РО при различных его диаметрах. Разработано программное обеспечение для определения величины потерь энергии, затрачиваемой на прокачку среды по трубопроводу через РО.

Ключевые слова: регулирующий клапан, потери мощности, потери энергии.

V.N. SURICOV Candidate of Engineering, professor,
Y.A. TOTUHOF Candidate of Engineering, professor,
I.V. ANTONISHIN, postgraduate,
A.V. GRISHENKO, postgraduate,

St. Petersburg State Technological University of Plant Polymers
198095 Saint-Petersburg, Ivana Chernih St., 4. *E-mail: antonishinivan@gmail.com*

The choice of the control valve automatic control system based on energy savings in the pipeline

Abstract. The dependence of the loss of energy used when the opening degree of control valve its various diameters. Software has been developed to determine the loss of energy used for pumping medium through the pipeline through the control valve.

Key words: Control valve, power loss, energy loss.

Для обеспечения требуемых технико-экономических показателей систем автоматического управления (САУ) технологическими процессами важное значение имеет выбор регулирующего органа (РО). Существующая практика выбора РО основана на рекомендациях РТМ 108.711.02.79, которые позволяют осуществить подбор клапана по виду среды, коэффициенту пропускной способности, условному диаметру, кавитации, перепаду давления на РО, конструктивным особенностям и условиям эксплуатации.

Выбор РО в основном основывается на подборе по коэффициенту пропускной способности. Тем самым гарантируется, что выбранный РО сможет пропустить через себя требуемое количество среды. Однако, при этом не принимаются во внимание потери энергии в гидравлической сети, связанные с работой РО.

В этой связи в данной статье предлагается проводить выбор РО не только на основе РТМ, но и с учетом экономии затрат энергии, расходуемой на РО. Для решения этой задачи была разработана методика и программа. На рис. 1 представлены графики изменения потерь энергии в зависимости от степени открытия для двух РО, отличающихся друг от друга только диаметром и пропускной характеристикой. Кривые получены с помощью уравнений (1, 2 и 3), где E – энергия, затрачиваемая на перекачку среды через РО, Q_n – номинальный расход несжимаемой жидкости, q – относительный расход несжимаемой жидкости при течении через РО, $\Delta P_{p.o.}$ – перепад давления на РО, n – гидравлический модуль системы, описывающий характеристики трубопроводной сети с РО, σ – относительная пропускная способность РО, ΔP_c – общий перепад давления в системе.

$$E = q \cdot Qn \cdot \Delta P_{p.o.} \quad (1), \quad q = \sigma \cdot \sqrt{\frac{1+n^2}{1+n^2 \cdot \sigma^2}} \quad (2),$$

$$\Delta P_{p.o.} = \frac{\Delta P_c}{1+n^2 \cdot \sigma^2} \quad (3).$$

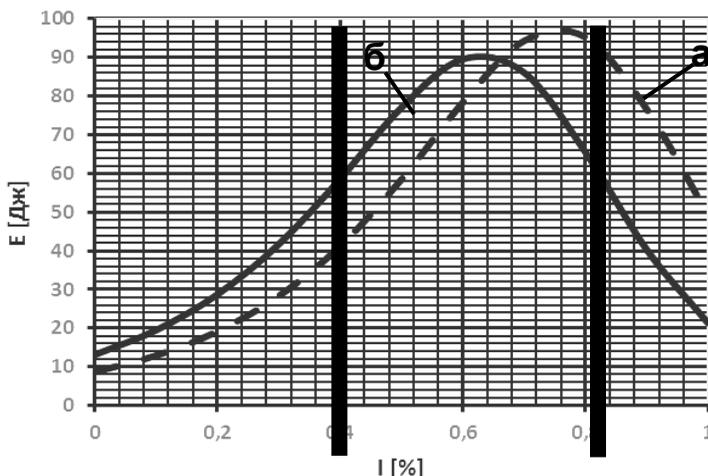


Рис. 1. Графики изменения потерь энергии в зависимости от относительной степени открытия L:

Линиями отмечены границы рабочего диапазона 0,4 – 0,8. Пропускная способность трубопроводной сети – 67,3 м³/час, диаметр трубы – 170 мм

График а – изменение потерь энергии при использовании клапана Neles тип R с диаметром 40 мм и пропускной способностью 127 м³/час

График б – изменение потерь энергии при использовании клапана Neles тип R с диаметром 50 мм и пропускной способностью 208 м³/час

Из рис. 1 видно, что РО, пропускная способность которого меньше, будет иметь большие потери энергии, т.к. площадь кривой, ограниченной рабочим диапазоном в пределах 0,4-0,8 равняется 49,42 Дж против 43,77 Дж у РО с большей пропускной способностью. Поэтому стоит отдать предпочтение клапану Neles тип R с диаметром 50мм. и пропускной способностью 208 м³/час. В этом случае потери энергии в гидравлической сети будут меньшими.

При выборе РО вместе с расчетом потерь энергии гидравлической сети необходимо провести оценку управляемости технологического процесса. Для этого можно использовать показатель (коэффициент усиления) Gain, который, по рекомендации фирмы Metso, должен быть больше 0,5 и меньше 3,5. Сравнение этих характеристик представлено на рис. 2.

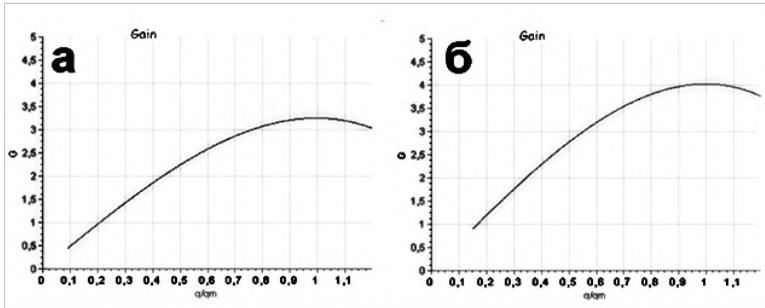


Рис. 2. Графики изменения Gain в зависимости от относительного расхода q/q_m (q – относительный расход, q_m – максимальный расход в пределах рабочего диапазона РО). Пропускная способность трубопроводной сети – $67,3 \text{ м}^3/\text{час}$, диаметр трубы – 170 мм .

График а - изменение Gain при использовании клапана Neles тип R с диаметром 40 мм и пропускной способностью $127 \text{ м}^3/\text{час}$.

График б - изменение Gain при использовании клапана Neles тип R с диаметром 50 мм и пропускной способностью $208 \text{ м}^3/\text{час}$.

Из рис. 2 видно, что РО с большим диаметром будет обеспечивать меньшие потери энергии, но управляемость процесса будет несколько хуже, чем у РО с меньшим диаметром, который соответствует рекомендуемым границам показателя Gain. Это значит, что качество управления у РО с меньшим диаметром будет выше, однако потери энергии - больше. Теме не менее, оба РО соответствуют заданным требованиям РТМ и рекомендациям фирмы Metso. Окончательный вариант выбора РО связан с синтезом САУ для обеспечения требуемого качества управления технологическим процессом в гидравлической системе.

На основе вышесказанного можно сделать вывод о том, что при выборе РО недостаточно руководствоваться только РТМ, нужно учитывать энергоэффективность работы РО и управляемость технологического процесса в САУ. РО, выбранный только с учетом энергоэффективности может плохо управлять технологическим процессом, а стремление к управляемости может, в свою очередь, привести к высоким затратам на энергию при работе РО.

Литература

1. Иткина Д.М. Исполнительные устройства систем управления в химической и нефтехимической промышленности. – М.: Химия. 1984.
2. Шински Ф. Управление процессами по критерию экономии энергии. – М.: Мир. 1981.
3. РТМ 108.711.02-79 Арматура энергетическая. Методы определения пропускной способности регулирующих органов и выбор оптимальной расходной характеристики
4. Jari Kirmanen Flow Control Manual 6th edition. – Metso Automation Inc. 2011.

Суриков Валерий Николаевич,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров»

Тотухов Юрий Александрович,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров»

Антонишин Иван Валерьевич,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров»

Грищенко Антон Валерьевич,

ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный технологический университет растительных полимеров»

УДК 669.046:658.012.56

Е.В. ЗАХАРОВА, к.т.н., доцент;

Е.П. БЫКОВ, студент

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

Управление нагревом металла в печах периодического действия

Аннотация. Разработанная система определяет эффективную полосу пропускания объекта и формирует управляющее воздействие, реализующее цель оптимизации управления нагревом металла. Система обеспечивает управление по критериям минимального расхода топлива, минимальной окалины, максимального быстродействия.

Ключевые слова: импульсный нагрев металла, оптимальная фильтрация, теплопоглощение металла.

E.V. ZAKHAROVA, Candidate of Engineering, docent,

E.P. BYKOV, student

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

Control of the heating of the metal in furnaces periodic action

Abstract. The developed system determines the effective bandwidth of the object and generates a control action, realizing the goal of optimizing the management of the heating of the metal. The system provides control according to the criteria of minimum fuel consumption, minimum scale, maximum performance.

Key words: pulse heating of metal, optimal filtering, heat absorption of the metal.

Рассматривается система импульсного нагрева металла, реализующая способ управления нагревом металла в печах периодического действия. В системе использован принцип частотно-импульсной модуляции расхода топлива сигналом по скорости роста среднemasсовой

температуры металла. В качестве датчика среднемассовой температуры использован тепломер.

Использование теплового потока, поглощенного металлом, в качестве наблюдаемой и управляемой координаты при нагреве металла в печах периодического действия позволяет исключить неопределенность, связанную с переменным во времени тепловосприятием металла, и существенно упростить задачу управления нестационарным объектом. При организации управляющего воздействия в эффективной полосе пропускания объекта влияние нестационарных свойств объекта на качество процесса управления может стать пренебрежимо малым.

В работе решается задача формирования управляющего воздействия для нагрева металла в эффективной полосе пропускания объекта на основе нестационарного формирующего фильтра. Формирующий фильтр представлен системой управления тепловым состоянием технологического канала (футеровки печи косвенного радиационного режима нагрева металла, муфеля печи с защитной атмосферой, газа рабочего пространства печи прямого направленного нагрева), преобразующего воздействие со стороны горелочных устройств $B_T = f(\tau)$ в скоростное или частотное управляющее воздействие на металл. В зависимости от типа рассматриваемой печи регулирующее воздействие организуется со стороны футеровки, муфеля и газа соответственно $\partial u / \partial \tau = f(\omega, \tau, u)$ [1, 2] (здесь u - управляющее воздействие, τ - время, ω - частота фильтра, B_T - расход топлива).

Вследствие астатизма системы, а также фильтрующих свойств рассматриваемого технологического канала амплитудно-частотная характеристика системы имеет характер полосового фильтра. Полоса пропускания системы, т. е. полоса формирования управляющего воздействия ограничена снизу частотой среза регулятора, а сверху частотой среза технологического канала.

Задача управления нагревом металла сводится к определению в указанной полосе формирования фильтра оптимальной частоты ω_{opt} , при которой управляющее воздействие, сформированное фильтром, обеспечивает заданный тепловой поток [3].

Задача реализована на двухконтурной АСР, структурная схема к которой представлена на рис. 1.

Регулируемая величина в основном контуре – теплопоглощение металла $q_M = f(\tau)$, регулируемая величина в стабилизирующем контуре (формирующем фильтре) $\partial u / \partial \tau = f(\omega, \tau, u)$ является управляющим воздействием для теплопоглощения металла, регулирующим воздействием для величины $\partial u / \partial \tau$ является расход топлива $B_T = f(\tau)$; $\varepsilon_1 -$

невязка заданного и текущего теплопоглощения металла $q_m(\tau)$; ε_2 – разница заданного и текущего значения величины $\partial u / \partial \tau$.

На рис. 2 изображены кривые изменения температуры поверхности $T(R, \tau)$ и теплового центра $T(0, \tau)$ нагреваемого металла, температуры газа $T_r(\tau)$, теплопоглощения металла $q_m(\tau)$ и расхода топлива $B_r(\tau)$ для печи периодического действия производительностью 520 кг/ч с размерами заготовок 0,6×0,56×0,4 м из стали марки 5ХНМ, работающей на природном газе с $Q_n^p = 35,8$ МДж/м³.

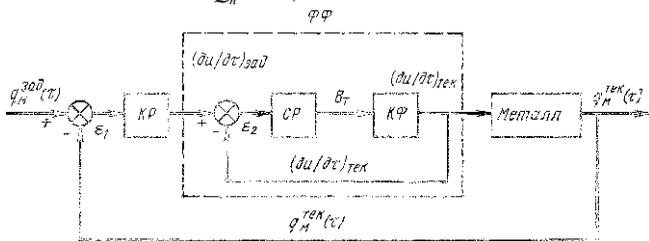


Рис. 1. Схема двухконтурной АСР:

КР – корректирующий регулятор; СР – стабилизирующий регулятор; КФ – канал формирования скоростного воздействия; ФФ – формирующий фильтр

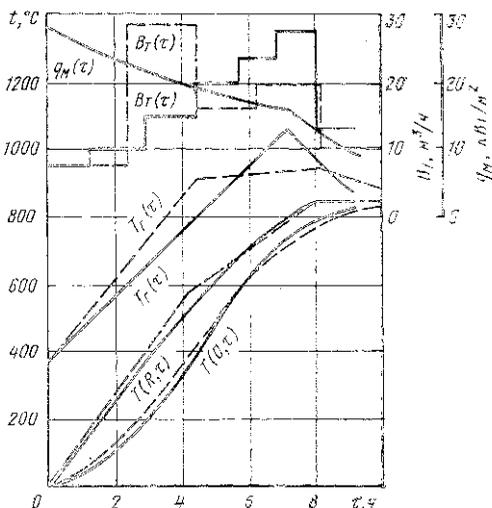


Рис. 2. Графики изменения температуры поверхности и теплового центра металла, температуры газа, теплопоглощения металла и расхода топлива для базового объекта (- - -) и предлагаемого способа (—) управления нагревом

Использование нестационарного формирующего фильтра для формирования управляющего воздействия на металл $\partial T_f(\tau) / \partial \tau = f(\tau, \omega, T_f)$ в двухконтурной АСР позволяет повысить эффективность использования топлива печи.

Литература

1. **Захарова Е. В., Девочкина С. И.** Оптимальное управление нагревом металла в сварочной зоне методической печи // Изв. вуз. Черная металлургия. 1985. № 4. С. 156.
2. **Девочкина С. И., Захарова Е. В.** Система управления нагревом металла // Изв. вуз. Черная металлургия. 1987. № 2. С. 97-100.
3. **Захарова Е. В., Девочкина С. И.** Программное управление нагревом металла // Изв. Вуз. Черная металлургия. 1985. № 10. С. 155.

Захарова Евгения Валериановна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

Быков Евгений Павлович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: evgenii.bykov@mail.ru

УДК 681.5.01; 681.5.017

И.К. МУРАВЬЕВ, ассистент

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

Этапы поиска и результаты исследования факторов влияния параметров внешней среды на эффективность энергоблоков ПГУ

Аннотация. Выполнено исследование влияния параметров внешней среды на эффективность технологического процесса в ПГУ. Показано, что ключевыми факторами являются неконтролируемое изменение массового расхода общего воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ, и изменение температуры воздуха за компрессором ГТУ. Стабилизация массового расхода общего воздуха вводит технологические параметры блока, в том числе КПД, в расчетные диапазоны при изменяющейся температуре наружного воздуха.

Ключевые слова: технология проектирования систем управления, тепловая электростанция, газотурбинная установка, парогазовые технологии, эффективность энергоблока, режимные и внешние факторы, математическая и имитационная модели, синтез САУ.

I.K. MURAVEV, assistant

Ivanovo State Power University

153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. E-mail: kafsu@su.ispu.ru

Stages of search and research results of environment parameters influences on the efficiency of CCGT power unit

Abstract. Research of the environmental parameters effect on the process efficiency at CCGT was done. Shown that the key factors are uncontrollable change of the total mass flow rate of the air supplied to the compressor gas turbine and an air temperature change behind the gas turbine compressor. Stabilization the total mass flow rate of the air rate brings process parameters of the unit, including efficiency factor, into the design range under the changing external air temperature.

Key words: control systems design technology, thermal power plant, gas-turbine power unit, gas-vapor technologies, power unit efficiency, operating and external factors, mathematical and simulation model, ACS design.

Современный этап развития электроэнергетики требует от системообразующей АСУТП энергоблока, и прежде всего от АСУТП энергоблоков ПГУ, обеспечить более полный учет изменяющихся режимных и внешних факторов, которые ведут к неполноценности использования инновационного оборудования через существенное снижение экологической и экономической эффективности [1].

Современные энергоблоки, построенные на базе парогазовых технологий, существенно поднимают эффективность использования топливно-энергетических ресурсов (расчетные оценки КПД энергоблоков ПГУ достигают более 50-60 %).

Однако опыт эксплуатации и экспериментальные исследования энергоблоков ПГУ показывают, что эффективность использования топлива весьма чувствительна к вариации множества режимных и внешних факторов: техническому состоянию тепломеханического оборудования, климатическим условиям и др.

Одним из таких климатических факторов является температура наружного воздуха, ее естественные отклонения от расчетной (+15 °С) ведут к существенному снижению эффективности использования топлива и к неоправданным потерям до 5-6% коэффициента полезного действия КПД [2-4].

Исследование влияния параметров внешней среды на эффективность технологического процесса в ПГУ выполнялось в несколько этапов.

1 этап. Разрабатывалась нелинейная (всерезимная) математическая и имитационная модели энергоблока ПГУ с оперативным расчетом показателей технической эффективности. Основная трудность моделирования заключалась в том, чтобы обоснованно выбрать приемлемую степень сложности модели адекватную решаемой задаче. В основе модели лежат законы неравновесной термодинамики, что позволяет использовать фундаментальную физико-математическую основу и строго оценить влияние принимаемых допущений на качество

результата. Построение математической модели энергоблока ПГУ выполнено в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений и соответствующих уравнений состояния. При этом в качестве исходных параметров используется, как правило, конструктивные и режимные параметры реального оборудования. В целом динамическая модель блока обладает открытой структурой с выделенной инвариантной и изменяемой для разных блоков ПГУ частями, что обеспечивает ее широкое использование, в том числе, для расчетов технико-экономических показателей в режиме реального времени [5].

2 этап.

1 стадия. Выполнялась оценка адекватности математической модели на стадии ее настройки: в статике (по результатам тепло гидравлического расчета и по режимной карте при температурах наружного воздуха +15 и +30 °С при 100 % нагрузке газовой турбины) и в динамике (при подаче на вход модели трендов с испытательного режима при температуре наружного воздуха -15 °С и с эксплуатационного режима при температуре наружного воздуха +26,6 °С) [5,6].

2 стадия. Выполнялась настройка многопараметрической математической модели объекта на оптимальный режим при изменяющихся внешних и режимных условиях и проводилась оценка ее адекватности. Оптимальным (эталонным) режимом считается управление по режимной карте. Модель настроена на режимную карту, затем под заданные настройки был найден реальный режим эксплуатации блока. Проведено сравнение результатов, которые были получены на модели с данными протокола эксплуатации [6].

3 этап. Выполнялась оценка уровня влияния режимных факторов на эффективность работы блока. Проводилось исследование изменений КПД ГТУ, КУ, ПТУ и энергоблока в целом при различных методиках расчета значения КПД и при изменяющихся внешних и режимных условиях. Показано, что значение КПД блока критично к изменению основных варьируемых параметров: температуры наружного воздуха и коэффициента избытка воздуха за ГТУ (присадка холодного воздуха). При этом фактические значения оценок КПД энергоблоков ПГУ могут изменяться в широком диапазоне и падать вплоть до значений паросиловых блоков [5,6].

4 этап. Проводились вычислительные эксперименты по поиску и анализу критических факторов влияния параметров внешней среды на эффективность энергоблока. Показано, что в случае, если факторы внешней среды не учитываются, это приводит к неконтролируемым вариациям режимных параметров энергоблока (температуры уходящих газов за КС и ГТУ, активной мощности ГТ и др.), неэффективной работе ГТУ, утилизационной части ПГУ и энергоблока в целом [7,8].

Например, при изменении температуры наружного воздуха (от -5 до +25 °С) при заданном постоянном расходе топлива 6,63 кг/с и воздуха 352 кг/с (что соответствует нагрузке ГТУ 110 МВт), технологические параметры блока (температура уходящих газов за ГТУ, температура

перегретого пара контура высокого давления и др.) отклоняются от расчетных и выходят за допустимые пределы. Соответственно: температура уходящих газов за ГТУ отклоняется на 45°C , а температура перегретого пара контура высокого давления - на 40°C .

Результаты поисковых исследований показали, что ключевыми (критическими) факторами влияния параметров внешней среды на эффективность работы блока являются неконтролируемое изменение массового расхода общего воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ и изменение температуры воздуха за компрессором ГТУ [8].

5 этап. Осуществление автоматической коррекции (стабилизации) массового расхода воздуха, подаваемого в компрессор ГТУ. В результате технологические параметры блока, в том числе КПД оборудования, при изменяющейся температуре наружного воздуха вводятся в расчетные диапазоны эффективного управления. В частности, температура перегретого пара контура ВД остается на расчетном уровне 510°C , КПД КУ на уровне расчетного - 85%, КПД ПТ ~ 32,5%, а КПД ПГУ ~ также на расчетном уровне (51-52%) [8].

Литература

1. **Теория и технология** систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн. Кн. 1. Проблемы и задачи. Кн. 2. Проектирование / Под общей ред. д-ра техн. наук, проф. Ю.С. Тверского; ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина». – Иваново, 2013. – Кн. 1 – 260с. – Кн. 2 – 436 с.
2. **Давыдов, А. В.** Опыт освоения парогазовых энергоблоков ПГУ-450Т / А.В. Давыдов, Ю.А. Радин // Электрические станции. – 2009. – № 9. – С. 22–26.
3. **Радин, Ю. А.** Определение допустимого регулировочного диапазона нагрузок энергоблока ПГУ-450Т при его работе в конденсационном режиме / Ю.А. Радин, А.В. Давыдов, А.В. Чугин, И.Н. Писковацков // Теплоэнергетика. – 2004. – № 5. – С. 47–52.
4. **Ольховский Г.Г.** Энергетические газотурбинные установки. – М.: «Энергоатомиздат», 1985, с. 165-166.
5. **Тверской Ю.С., Муравьев И.К.** Математическая модель энергоблока ПГУ-325 и ее использование для расчета КПД установки // Вестник ИГЭУ, Вып.№5, Иваново, 2011. – С. 12-18.
6. **Муравьев И.К., Тверской Ю.С.** Создание математической модели и расчет характеристик энергоблока ПГУ // Сборник трудов конференции МОДЕЛИРОВАНИЕ-2012, Киев, 2012. – С. 297-303.
7. **Муравьев И.К.** Технология интеллектуализации АСУТП и повышение всережимной эффективности энергоблоков ПГУ / Оптимизация и повышение эффективности работы ТЭС путём внедрения АСУТП: сб. докл. // Третья Междунар. научно-техн. конференция. – М.: ОАО «ВТИ», 2014. – С. 66-72.
8. **Тверской Ю.С., Муравьев И.К.** Об одном способе обеспечения расчетной эффективности энергоблоков ПГУ // Вестник ИГЭУ. Вып.1. – Иваново: Изд. ИГЭУ, 2015. – С. 30-36.

Муравьев Игорь Константинович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

УДК 681.5.017

Д.В. ЛАВРЕНТИЧЕВ, аспирант

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

Разработка и исследование адекватности математической модели первого контура энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000

Аннотация. Рассматриваются результаты разработки математической модели первого контура энергоблока АЭС. Дана оценка меры адекватности математической модели по основным динамическим каналам регулирования.

Ключевые слова: математическая модель, мера адекватности, энергоблок, АЭС, тренды, АСУТП.

D.V. LAVRENTICHEV, postgraduate

Ivanovo State Power University
153003 Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34. *E-mail: kafsu@su.ispu.ru*

Development and investigation of the adequacy of the mathematical model of the primary circuit NPP with reactor VVER-1000

Abstract. Discusses the results of the development of a mathematical model of the primary circuit of NPP power unit. The assessment measures the adequacy of the mathematical model the basic dynamic channels regulation.

Key words: the mathematical model, the measure of adequacy, power unit, NPP, trends, process control systems.

Основная проблема энергоблоков АЭС, усложняющая несение суточного графика энергопотребления, связана с ограниченными маневренными возможностями изменения мощности энергоблоков. Поиск и исследование новых технических решений на ранних стадиях разработок не возможно без специальных математических моделей [1].

В основу нелинейной (всережимной) математической модели первого контура энергоблока АЭС положены фундаментальные физико-математические основы, что позволяет строго оценивать влияние принимаемых допущений, внешних и режимных факторов на качество результата.

Математическая модель имеет открытую структуру, элементы которой представляют собой технологические участки оборудования (рис. 1).

При выводе уравнений, описывающих процессы, происходящие в первом контуре, принимались допущения:

- рассмотрена только одна циркуляционная петля из четырех и один парогенератор;
- пренебрежение тепловыми потерями в окружающую среду;
- предполагается, что изменение давления пара перед турбиной и в парогенераторе одинаково;
- давление в КД принимается равным сумме давлений пара и азота;
- давление во всех точках КД одинаково;
- сжатие пара в КД происходит по линии насыщения;
- конденсация пара, нагрев впрыскиваемой воды и ее испарение происходят мгновенно.

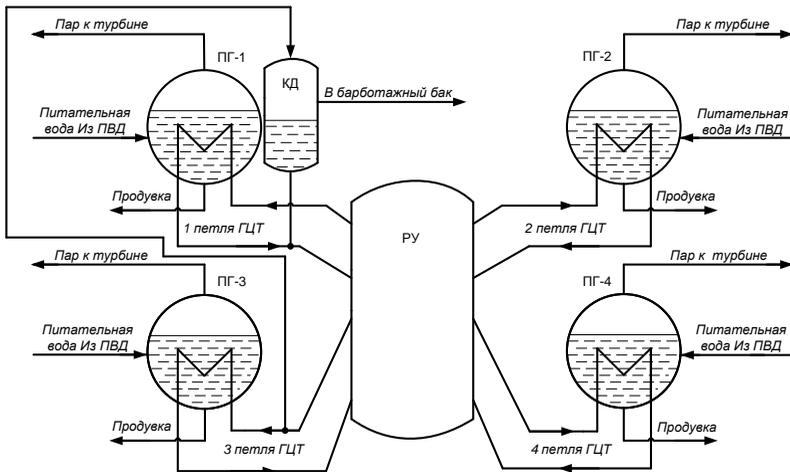


Рис. 1. Функциональная структура математической модели 1 контура энергоблока АЭС: РУ – реакторная установка; ПГ – парогенератор; ГЦТ – главный циркуляционный трубопровод; КД – компенсатор давления; ПВД – подогреватель высокого давления

На основе разработанной математической модели была реализована имитационная модель. Для построения имитационной модели были найдены все необходимые исходные данные. Разработка имитационной модели производилась в среде моделирования Simulink. Для обеспечения достаточной точности вычислений выбран шаг интегрирования 0,01 сек. Метод решения систем дифференциальных уравнений – ode15s (многошаговый метод переменного порядка).

Для определения достоверности результатов вычислений имитационной модели была произведена оценка ее адекватности путем сравнения проектных значений параметров на определенном режиме и значений тех же параметров, полученных с помощью имитационной модели. В результате выяснилось, что все параметры имитационной

модели соответствуют проектным значениям. Следовательно, можно считать имитационную модель в статике верифицированной.

При оценке адекватности модели в динамике был произведен сравнительный анализ графиков переходных процессов, полученных с помощью имитационной модели, и трендов, снятых с архива действующего энергоблока АЭС при одном и том же возмущающем воздействии. В данном случае в качестве реального объекта выбран энергоблок №3 Калининской АЭС. Для проведения анализа выбран процесс снижения тепловой мощности реакторной установки, а затем ее подъем до номинального значения. Критерием адекватности модели в этом случае является совпадение значений переходных процессов и трендов, а также схожий характер изменения кривой. Общим возмущающим воздействием является изменение положения регулирующей группы стержней. Результаты сопоставления представлены на рис. 2.

Количественная оценка адекватности разработанной математической и имитационной моделей, выполнена по критерию среднего квадратичного отклонения (СКО) сигнала, полученного с помощью имитационной модели, от сигнала, полученного с реального объекта.

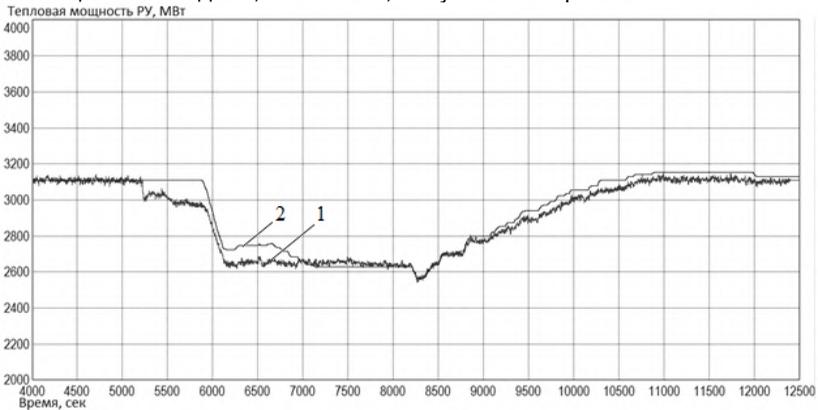


Рис. 2. Сопоставление по тепловой мощности реакторной установки:
1 - тренд, 2 - модель

В результате определено, что СКО по основным параметрам модели, выраженное в процентах от номинального значения, не превышает 7%. Это говорит о высокой точности работы полученной имитационной модели первого контура энергоблока АЭС с реактором типа ВВЭР-1000 при различной нагрузке. Таким образом, модель может быть использована для исследования как технологических режимов, так и задач автоматического контроля и управления, так как она представляет возможность проведения адекватных модельных экспериментов

Литература

1. **Теория** и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн.: Кн. 1. Проблемы и задачи. Кн. 2. Проектирование. 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. – Кн. 1 – 260 с. – Кн. 2 – 436 с. – Кн. 3 – 176 с.
2. **Баклушин Р.П.** Эксплуатационные режимы АЭС: учебное пособие для вузов / Р. П. Баклушин. – 2-е изд. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 532 с.
3. **Демченко В.А.** Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса «Астропринт», 2001 г. – 308 с.
4. **Плютинский В.И., Погорелов В.И.** Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок АЭС: Учебник для техникумов. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
5. **Тверской Ю.С.** Локальные системы управления: Учеб.-метод пособие / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина». – Иваново, 2011. – 128 с.
6. **Опыт** разработки технических средств обучения на базе платформы ЭНИКАД для персонала атомных и тепловых станций. Чернаков В.А., Королев С.А., Выговский С.Б., Краюшкин Ю.В., и др. – ЭНИКО "Тренажерные системы обучения". – 2009 г. , 25 с.

Лаврентичев Дмитрий Владимирович,
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

УДК 621.374

Г.Г. ЗЕЗЮЛЬКИН, к.т.н., доцент;
А.А. ГОРДИЛОВСКИЙ, к.т.н., доцент;
В.С. ПЕТРОВ, к.т.н., доцент

Филиал МЭИ в г. Смоленск
214013. г. Смоленск, Энергетический проезд, д.1
E-mail: aa60@mail.ru

Особенности анализа и синтеза цифровых систем автоматического управления ключевыми преобразователями

Аннотация. Показано, что наиболее перспективным является применение стационарных импульсных моделей для решения задач анализа и синтеза цифровых систем управления с ключевыми преобразователями в качестве объекта. Рассмотрен пример синтеза оптимальной по быстродействию цифровой системы управления ключевым преобразователем.

Ключевые слова: цифровые системы управления, ключевые преобразователи, стационарные импульсные модели, процессы конечной длительности.

G.G. ZEZYULKIN,
A.A. GORDILOVSKIY, V.S. PETROV

Branch of federal state budgetary educational institution of higher education " National
Research University" MEI " in Smolensk
111250 Moscow, ul . Krasnokazarmennaya, 14. E-mail: aa60@mail.ru

Features of the analysis and synthesis of digital systems of automatic control of key transducers

Abstract: The results showed that the most promising is the use of a stationary impulse models for solving problems of analysis and synthesis of digital control systems with key transducers as the object. An example of the synthesis of time-optimal digital control systems of key transducer was analyzed.

Key words: digital control systems, key transducers, stationary impulse models, processes of finite duration.

В [1, 2] были получены стационарные импульсные модели ключевых преобразователей в базах дискретных экспоненциальных функций и ортогональной системы единичных векторов. Стационарные импульсные модели идеально подходят для проектирования цифровых систем управления ключевыми преобразователями.

Стационарные импульсные модели ключевых преобразователей позволяют трансформировать в область теории ключевых преобразователей и систем с периодически изменяющимися кусочно-постоянными коэффициентами результаты теории стационарных импульсных и цифровых систем [3].

Более подробно остановимся на особенностях синтеза оптимальной по минимуму интервалов коммутации цифровой системы управления ключевым преобразователем при полной и неполной информации о выходных координатах.

Процессы в ключевом преобразователе, исходя из стационарной импульсной модели, описываются матричным разностным уравнением вида

$$[X((k+1)T_+)] = [H] \times [X(kT_+)] + [G] \times [U(kT)], \quad (1)$$

где $[H] = [K] \times \exp[A_c]T$, $[G] = [K] \times [A_c]^{-1} \times (\exp[A_c]T - [1])$; $[K]$ - стационарная матрица переключений, определяемая видом кусочно-постоянных периодических коэффициентов системы; $U(kT)$ - управляющие воздействия.

Как показано в [3], минимальное число дискретных интервалов, за которое можно выйти на установившийся режим, определяется выражением

$$N = \text{entier} \left[\frac{n}{1} \right] + 1 \quad (2)$$

где n – порядок силовой цепи ключевого преобразователя; 1 – размерность вектора управления $U(T)$.

При этом управляющее воздействие, обеспечивающее оптимальный переходный процесс, определяется из выражения

$$[U(0) \ U(T) \dots U((N-1)T)]^T = [H]^{-1}[G] [H]^{-2}[G] \dots [H]^{-N}[G] \times \left\{ H^{-N} \times [X_{\text{зад}}] - [X(0)] \right\}, \quad (3)$$

где $[X_{\text{зад}}]$ - заданное значение переменной состояния в квазиустановившемся режиме; $[X(0)]$ - начальные условия.

Необходимые начальные условия можно сформировать с помощью замкнутой микропроцессорной системы управления (рис. 1).

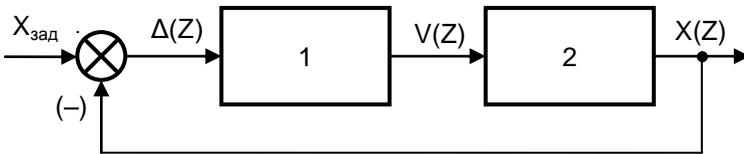


Рис. 1. Структурная схема цифровой системы управления:
1 – микропроцессор (цифровой фильтр) с передаточной функцией $W(Z)$,
2 – ключевой преобразователь (объект управления)

Расчет передаточной функции $W(Z)$ цифрового фильтра (микропроцессора) проводится в следующем порядке:

- определяют Z -преобразование выходной последовательности цифрового фильтра $U(Z)$, используя стационарную импульсную модель и выражение (3);

- находят Z -преобразование входной последовательности цифрового фильтра (сигнал рассогласования)

$$\Delta(Z) = X_{\text{зад}}(Z) - X(Z); \quad (4)$$

- находят передаточную функцию цифрового фильтра (микропроцессора)

$$W(Z) = \frac{U(Z)}{\Delta(Z)}. \quad (5)$$

В качестве примера рассмотрим синтез оптимальных по быстродействию переходных процессов в замкнутой цифровой системе управления автономного инвертора тока с параметрами $U = 100\text{В}$, $L_d = 0,1\text{Гн}$, $R_H = 10\text{Ом}$, $C_H = 200\text{мкФ}$, $T = 0,002\text{с}$.

Из стационарной импульсной модели следует, что автономный инвертор тока описывается системой разностных уравнений вида:

$$\begin{bmatrix} I_d((k+1)T) \\ U_2((k+1)T) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,15 & -0,0419 \\ -4,16 & 0,268 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_d(kT) \\ U_2(kT) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0,1269 & -0,0849 \\ -0,849 & -0,04193 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} E(kT) \\ 0 \end{bmatrix},$$

где I_d - ток источника питания, U_2 - напряжение на выходе инвертора; E - ЭДС источника питания.

Пользуясь выражением (3), находим:

$$\begin{bmatrix} E(0) & E(T) & E(2T) \end{bmatrix}^T = [221,9 \ 128,9 \ 100]^T, \text{ при этом } I_d(0) = 0, \\ I_d(T) = 28,16\text{A}, \ I_d(2T) = 28,5\text{A}.$$

Определяем Z-преобразование выходной последовательности цифрового фильтра и исполнительного органа

$$\begin{aligned} E(Z) &= 221,9 + 128,9Z^{-1} + 100Z^{-2}(1 + Z^{-1} + Z^{-2} + \dots) = \\ &= \frac{221,9Z^2 - 92,9Z - 28,99}{Z(Z-1)}. \end{aligned}$$

Находим Z-преобразование входной последовательности цифрового фильтра и определяем передаточную функцию цифрового фильтра

$$W(Z) = \frac{E(Z)}{\Delta Z} = 7,788 \frac{Z^2 - 0,4188Z - 0,1301}{(Z-1)(Z+0,01168)}.$$

Переходный процесс заканчивается за два такта.

Таким образом, наиболее перспективным является применение стационарных импульсных моделей для решения задач анализа и синтеза цифровых систем автоматического управления ключевыми преобразователями в качестве объекта.

Помимо рассмотренного выше синтеза оптимальных по минимуму числа шагов цифровых систем автоматического управления ключевыми преобразователями при полной и неполной информации о выходных координатах, актуальными задачами являются:

- синтез цифровых систем управления ключевыми преобразователями по обобщенному квадратичному показателю качества;
- синтез оптимальных по быстродействию управлений ключевыми преобразователями при ограниченной энергии управляющих воздействий и др. [3].

Литература

1. Зезюлькин Г.Г., Гордиловский А.А. Применение дискретных экспоненциальных функций для анализа периодически нестационарных электрических цепей. Труды МКЭЭЭ-2014. – Крым, Алушта. – С.268-270.

2. **Зезолькин Г.Г., Гордиловский А.А.** Применение ортогональной системы единичных векторов для анализа нестационарных электрических цепей с ключевыми элементами. – Сборник трудов IV межд. НТК «Энергетика, информатика, инновации – 2014». – Смоленск: Универсум, 2014. – С.191-194.

3. **Кюо Б.** Теория и проектирование цифровых систем управления. – М.: Машиностроение, 1986.

УДК 621.3.076

В.И. ДОМАНОВ, к.т.н., профессор;
А.В. ДОМАНОВ, к.т.н., доцент;
Д.Г. МУРЗАКОВ, аспирант

Ульяновский государственный технический университет
432027, г.Ульяновск, ул.Северный Венец 32
E-mail: mdglab@bk.ru

Анализ и синтез системы управления следающим электроприводом

Аннотация. Рассматриваются вопросы построения инвариантных систем управления следающих электроприводов. Приведены формулы для определения параметров инвариантных цепей. Определены показатели колебательности для таких систем. Приводятся графики переходных процессов электропривода с различными инвариантными цепями. Отмечается эффективность применения упреждающей коррекции для снижения динамических ошибок.

Ключевые слова: следающий электропривод, точность, ошибка, инвариантная система, показатель колебательности, передаточная функция, упреждающая коррекция

Ulyanovsk state technical university, Ulyanovsk, Russian Federation

Analysis and synthesis of electric drive invariant system

Abstract: Questions of construction of servo drives invariant control systems. The formulas for determining the parameters of the invariant chain. Defined oscillation parameters for such systems. The schedule transient electric circuits with different invariant. The efficiency of the use of pre-emptive correction to reduce dynamic errors.

Keywords: follow-up motors, precision, error, invariant system, rate of oscillation, transfer function, pre-emptive correction

К современным следающим электроприводам станков и манипуляторов предъявляются высокие требования по статической и динамической точности при больших значениях скоростей и ускорений изменения управляющего воздействия. В этих условиях особенно эффективно применение принципа инвариантности [1-3].

Следающие электроприводы комбинированного управления содержат в себе элементы разомкнутой и замкнутой структуры управления. Для придания всей системе достаточного запаса устойчивости

могут быть применены любые корректирующие устройства в том числе подчиненное регулирование и упреждающая коррекция [4].

Рассмотрим систему, инвариантную к управляющему воздействию. Типовая структура такой следящей системы приведена на рис. 1,а, где:

$W_d(p)$ - передаточная функция компенсирующей цепи,

$W_1(p)$ - передаточная функция регулятора положения,

$W_2(p)$ - передаточная функция регулируемого электропривода.

При учете компенсирующей связи изображения для регулируемой величины $X(p)$ и ошибки системы $\varepsilon(p)$ соответственно будут равны

$$X(p) = \Phi(p)G(p), \quad (1)$$

где $W(p) = W_1(p)W_2(p)$; $\Phi(p) = \frac{W(p) \left[1 + \frac{W_d(p)}{W_1(p)} \right]}{1 + W(p)}$.

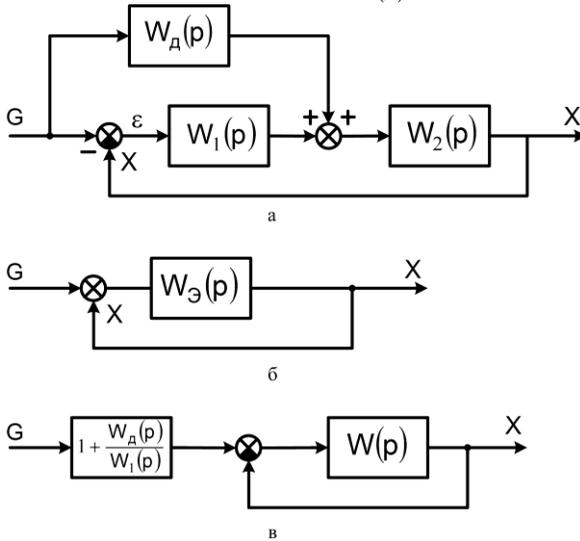


Рис. 1. Структурная схема системы с инвариантным управлением

$$\varepsilon(p) = \Phi_\varepsilon(p) \cdot G(p), \quad (2)$$

где $\Phi_\varepsilon(p) = \frac{1 + W_d(p) \cdot W_2(p)}{1 + W(p)}$.

Из последнего выражения следует условие инвариантности по задающему воздействию

$$W_d(p) = 1/W_2(p). \quad (3)$$

Выполнение условия (3) позволяет устранить вынужденную составляющую ошибки слежения, вызванную изменением управляющего воздействия $G(t)$.

Разложение в ряд условия (3) позволяет определить формирование компенсирующей цепи

$$W_d(p) = \frac{1}{W_2(p)} = \tau_1 p + \tau_2 p^2 + \dots \quad (4)$$

Таким образом, в следящих электроприводах для улучшения их работы требуется вводить производные от управляющего воздействия. С повышением порядка производной резко возрастает сложность ее получения (формирования). Это приводит к тому, что полная инвариантность практически недостижима. При формировании реальных компенсирующих цепей вида

$$W_d(p) = \tau_1 p + \frac{\tau_1 \tau_2 p^2}{1 + \tau_3 p} + \dots \quad (5)$$

Разомкнутый контур изменяет характеристическое уравнение замкнутой системы. Наличие нелинейности и особенности реализации комбинированного управления приводят к тому, что практически невозможно достичь условий абсолютной инвариантности, в реальных системах, а возможно лишь частичное выполнение этих условий.

Выполним синтез следящего электропривода с комбинированным управлением. На рис. 1,б,в приведены преобразованные структуры рассматриваемого электропривода, где

$$W_{\Sigma}(p) = \frac{\Phi(p)}{1 - \Phi(p)} = \frac{W(p) \left[1 + \frac{W_d(p)}{W_1(p)} \right]}{1 - W_d(p) W_2(p)}; \quad \Phi_S = 1 + \frac{W_d(p)}{W_1(p)} \frac{W(p)}{1 + W(p)}. \quad (6)$$

Точность следящей системы определяется в основном свойствами в низкочастотной области. Поэтому влияние компенсирующих сигналов $W_d(p)$ можно учитывать только в этой области. Инвариантные сигналы не влияют на характер свободного движения системы, поэтому среднечастотная часть формируется без их учета.

Для повышения точности в переходных режимах целесообразно применять инвариантные цепи коррекции. В случае, когда система имеет структуру (рис. 1,а) звено инвариантной коррекции (W_{Σ}) определяется по формуле

$$W_{\Sigma}(p) = \frac{1}{W_2(p)}.$$

В результате применения такой коррекции повышается астатизм системы, а в передаточной функции замкнутой системы появляются форсирующие составляющие в числителе.

Моделирование исследуемой системы показало эффективность применения упреждающей коррекции для снижения динамических ошибок без повышения колебательности [4].

Проведенные исследования показали, что:

- увеличение количества инвариантных сигналов приводит к снижению амплитуды динамической ошибки;
- введение сигнала по третьей производной и выше приводит к нарастанию пульсаций скорости;
- инвариантные цепи повышают колебательность системы, поэтому необходимо контролировать (ограничивать) динамические параметры задающего сигнала;
- для снижения динамических ошибок системы можно использовать упреждающую коррекцию.

Литература

1. **Менский Б.М.** Принцип инвариантности в автоматическом регулировании и управлении. – М.: Машиностроение, 1972, 360 с.
2. **Бишоп Р.** Современные системы управления / Р. Бишоп, Р. Дорф – М.: Изд-во Лаборатория базовых знаний, 2002. – 592 с.
3. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического регулирования. – СПб.: Издательство «Профессия», 2003. – 752 с.
4. **Боровиков М.А.** Расчет быстродействующих систем автоматизированного электропривода и автоматики. – Саратов: изд-во Саратовского университета, 1980. – 389 с.

Доманов Виктор Иванович,
«Электропривод и АПУ» УлГТУ Ульяновский государственный технический университет
Andrew.domanov@gmail.com

Доманов Андрей Викторович,
кандидат технических наук, доцент, директор Экспертно-аналитического центра НИТИ им. С.П. Капицы УлГУ. Ульяновский государственный технический университет
E-mail: Andrew.domanov@gmail.com

Мурзаков Дмитрий Геннадьевич,
аспирант кафедры «Электропривод и АПУ» УлГТУ. Ульяновский государственный университет.
E-mail: mdglab@bk.ru

УДК 621.316.728

В.И. ДОМАНОВ, к.т.н., профессор;
С.В. ГАВРИЛОВА, аспирант;
Д. С. ХАЛИУЛЛОВ, студент

Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, д. 32
E-mail: s.gavrilova.1990@mail.ru

Анализ системы согласованного вращения асинхронных двигателей

Аннотация. В работе рассматривается схема двух электроприводов, согласованных параметрически по скорости вращения. В качестве исполнительных предлагается использовать двухскоростные асинхронные двигатели. Для согласованной работы электроприводов используются свободные группы обмоток двигателей. Определены передаточные функции основных звеньев системы, синтезирована структура согласованного вращения. Составлена модель и получены графики переходных процессов исследуемой системы.

Ключевые слова: параметрическое управление, двухскоростной асинхронный двигатель, согласованное вращение, модель, передаточная функция, переходные процессы.

V.I. DOMANOV,
S.V. GAVRILOVA,
D.S. HALLIULLOV

Ulyanovsk state technical university, Ulyanovsk, Russian Federation
E-mail: s.gavrilova.1990@mail.ru

Analysis of the systems of concurrent rotation of the induction motors

Abstract. This article covers schematic diagrams of two drives harmonized by velocity parameters. Double speed induction motor is advised to implement as an actuating device. For harmonized rotation of drives free groups of engine windings are used. Transfer functions of main system's blocks are defined, structure of harmonized rotation synthesized. Model is built for system and graphics of transient process are obtained.

Keywords: parametrical control, double speed induction motor, harmonized rotation, model, transfer function, transient process.

Во многих системах электропривода (мостовые и порталные краны, электрический вал, текстильная промышленность и т.д.) требуется согласованная работа нескольких двигателей. Согласование работы систем электроприводов (СЭП) может выполняться по различным координатам: углу поворота, скорости вращения, моменту. СЭП с согласованием угла поворота можно отнести к следящим электроприводам [1]. Для реализации таких систем на базе асинхронных двигателей (АД) используют в основном машины с фазным ротором [2]. Согласую-

щий момент M_C в этом случае является функцией рассогласования углов поворота валов двигателей $\Delta\varphi$. Существует большое разнообразие схем, получивших название «электрический вал» [2]. Их отличительной особенностью является зависимость M_C от скорости вращения двигателей. Причем с увеличением скорости M_C снижается. СЭП с согласование момента используются в устройствах перемотки материалов и других механизмах.

В предлагаемой работе приводится анализ СЭП с согласованием скорости. Систем стабилизации и регулирования скорости достаточно много [2]. Их скорость можно согласовывать перекрёстными связями, созданием астатических систем и другими способами. В этом случае достигается широкий диапазон регулирования и высокая точность. Для этого необходимо использовать регулируемые преобразователи и датчики координат, в частности датчики скорости. В то же время существует большая группа электроприводов, в которой не требуется широкого диапазона регулирования и высокой точности. В этом случае целесообразнее использовать параметрические СЭП, они более просты и не требуют использования преобразователей и дополнительных датчиков. В [1] была предложена схема параметрического управления двухскоростного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (ДСАД). Для этого обмотки статора ДСАД разделялись на две независимые и равноценные группы, каждая из которых соединяется в звезду. Первая группа обмоток подключается к сети. При этом ЭДС на второй (свободной) группе обмоток пропорциональна скорости вращения.

ДСАД в таком включении можно использовать для создания СЭП, согласованных по скорости. Схема включения обмоток электрических машин, входящих в эту систему, приведена на рис.1.

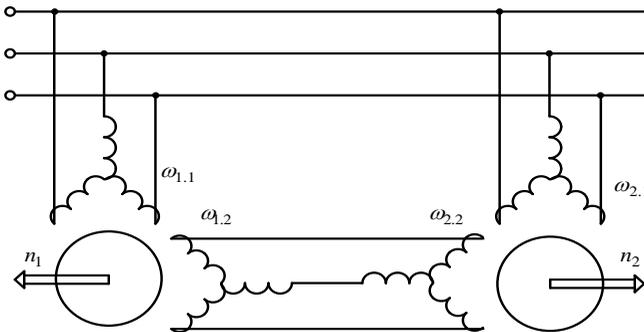


Рис. 1. Схема включения обмоток машин системы

При совпадении скоростей вращения двигателей ($n_1 = n_2$) ЭДС на свободных обмотках так же будут равны ($E_1 = E_2$). В этом случае токи по линиям связи между обмотками $\omega_{1,2}$ и $\omega_{2,2}$ не протекают. Если $n_1 \neq n_2$, то и $E_1 \neq E_2$ и по линиям связи начинают протекать уравнительные токи. Для двигателя с большей скоростью вращения ротора эти токи будут создавать тормозящий момент, а для другого – двигательный. Таким образом создаваемые моменты будут действовать как согласующие. Такая схема имеет высокую надежность, низкую стоимость, проста в наладке и обслуживании.

Отличительной особенностью работы рассматриваемой схемы является независимость согласующего момента от скорости, так как он зависит только от абсолютной разности скоростей вращения.

Рассмотрим динамику работы такой СЭП. Переходные процессы согласования скоростей вызваны различием ЭДС на свободных обмотках двигателей. Это позволяет сделать вывод, что работа схемы аналогична системе управления АД изменением напряжения на статоре [2]. На основании этого составим структурную схему системы согласованного по скорости вращения АД (рис. 2).

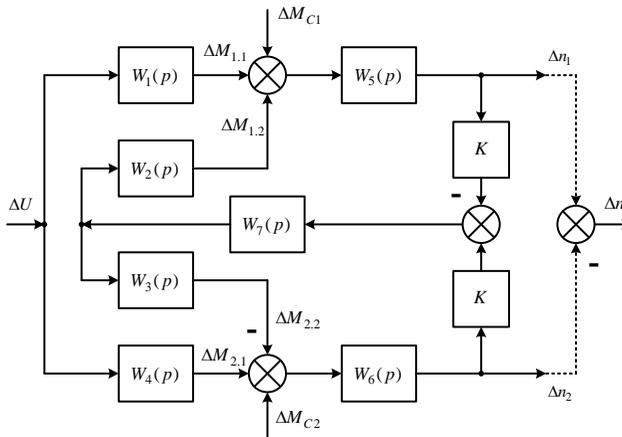


Рис. 2. Структурная схема системы согласованного по скорости вращения АД

В подобных электроприводах необходимо решить две задачи:

- создать систему с минимальными статическими ошибками Δn_1 и Δn_2 при действии моментов нагрузки ΔM_{C1} и ΔM_{C2} ;

- выполнить настройку таким образом, чтобы $\Delta n = \Delta n_1 - \Delta n_2$ была минимальной.

Выполнение первой задачи косвенно решает и вторую – чем меньше статические ошибки электроприводов системы, тем меньше разность этих ошибок. Для снижения статических ошибок увеличивают контурный коэффициент системы и применяют дополнительные корректирующие связи. Это говорит о том, что только параметрическими методами эту задачу решить нельзя.

В то же время, если приоритетной является вторая задача без условия минимизации ошибок отдельных электроприводов возможно решение на основе параметрических систем регулирования.

Приведенный анализ систем согласованного вращения показал, что для согласованного по скорости управления можно эффективно использовать ДСАД, на основе которых можно создать простые параметрические системы согласованного вращения.

Литература

1. **Доманов В.И., Доманов А.В., Гаврилова С.В.** Параметрическая автоматизация двухскоростного асинхронного двигателя/ Промышленные АСУ и контроллеры, 2015. №3. С. 3-7.
2. **Унгру Ф., Иордан Г.** Системы согласованного вращения асинхронных электродвигателей. Л.: Энергия, 1971. –182 с.

УДК 62-526

В.И. ДОМАНОВ, к.т.н., профессор;
К.Е. КАРПУХИН, к.т.н., доцент; А.В. СЕРГЕЕВ, аспирант

Ульяновский государственный технический университет
432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец 32
E-mail: sergeevoffice@gmail.com

Возможности системы управления сервоприводами Mitsubishi

Сервопривод - это система привода, которая в широком диапазоне регулирования скорости обеспечивает динамичные, высокоточные процессы и обеспечивает хорошую их повторяемость. Это система, предназначенная для отработки момента, скорости и позиции с заданной точностью и динамикой. Классический сервопривод состоит из двигателя, датчика позиции и системы управления, имеющей три контура регулирования (по позиции, скорости и току) [1].

В настоящее время, сервоприводы применяются там, где недостаточно точности регулирования обычных общепромышленных преобразователей частоты. Применение высококачественных сервоприводов

необходимо в высокопроизводительном оборудовании, где главным критерием является производительность. Сервоприводами оснащаются прецизионные системы поддержания скорости и позиционирования промышленных роботов и высокоточных станков. Сервоприводы также устанавливаются на координатно-сверлильных станках, на различных технологических транспортных системах, на различных вспомогательных механизмах и др. В приводах подач современных станков с ЧПУ обеспечивающих перемещения рабочих органов станка, на сегодняшний день применяются в основном шаговые двигатели, либо сервоприводы.

Современные серводвигатели обладают следующими характеристиками:

- высокая динамика,
- высокая точность позиционирования,
- высокая перегрузочная способность в широком диапазоне частоты вращения.

Кроме того, серводвигатели имеют следующие особенности:

- высокая точность поддержания заданной частоты вращения;
- широкий диапазон регулирования частоты вращения;
- малое время разгона;
- малое время регулирования вращающего момента;
- большой пусковой момент;
- малый момент инерции;
- малая масса;
- компактная конструкция [2].

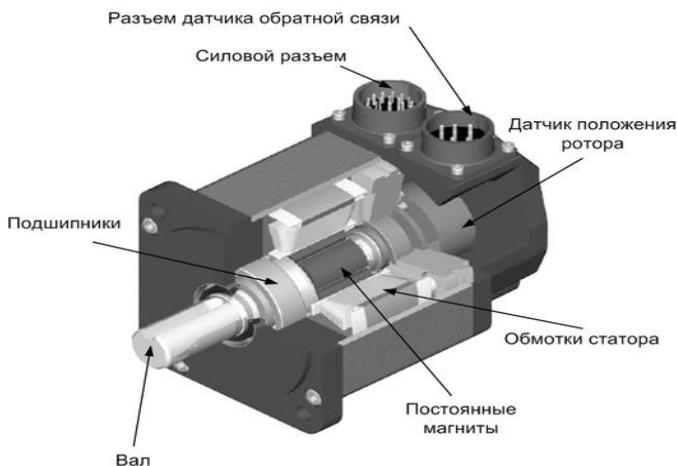
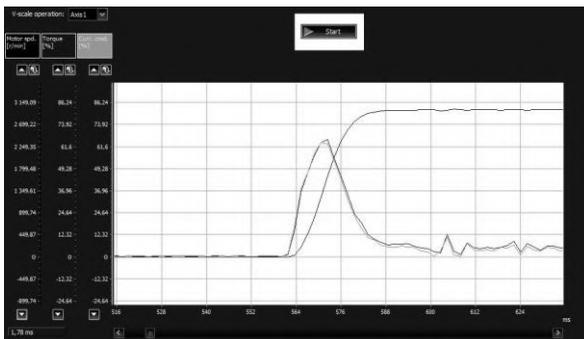


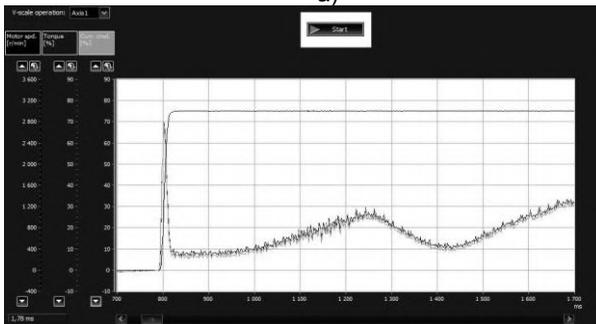
Рис. 1. Конструкция серводвигателя Mitsubishi HF-KP13

Сервоусилитель (преобразователь частоты) - устройство для управления сервомоторами.

Для управления сервомоторами подходят преобразователи частоты рассчитанные именно на работу с серводвигателем (синхронный двигатель с постоянными магнитами на роторе и датчиком положения ротора). Это означает, что в его внутреннюю математическую модель заложен синхронный двигатель и алгоритм его управления. Также, должен быть предусмотрен разъем для подключения датчика положения ротора. Преобразователь частоты должен поддерживать тип датчика положения ротора и протокол обмена информацией.



а)



б)

Рис. 2. Работа сервопривода:

а- 3000 об/мин, пуск 0, усилитель 101; б- 3000 об/мин, пуск 0, усилитель 101, изменение нагрузки на валу

Физически, все преобразователи частоты, предназначенные для работы с серводвигателями, конструктивно схожи, как правило, меняются только математические модели и алгоритмы управления [3].

Серводвигатели Mitsubishi обладают высочайшими динамическими характеристиками, являясь при этом самыми компактными и простыми в эксплуатации. Серводвигатели MELSERVO модели HC или HF вместе с сервоусилителями (модели MR-J2S или MR-J3), являются составными частями современного сервопривода. Восемнадцатиточный энкодер двигателя серии HF выдает 262144 импульсов/оборот (серия HC выдает 131072 импульсов/оборот), что позволяет добиться высочайших точностей в системах позиционирования любой сложности.

Внешним сигналом управления сервоусилителей могут быть как импульсные, так и аналоговые сигналы, или команды передаваемые по шине SSCNET. Интерфейс обратной связи в реальном времени адаптирует параметры управления к изменяющимся условиям нагрузки, обеспечивая сервиссистемам MELSERVO высокие эксплуатационные качества [4].

При помощи программного пакета MR-Configurator можно легко настроить и диагностировать сервосистему любой сложности. На рис.2 приведены примеры работы программы с сервоусилителем MR-J3-10B и сервомотором HF-KP13.

Литература

1. **Чиликин М.Г., Сандлер А.С.** Общий курс электропривода: учебник для вузов. -М.: Энергоиздат, 1981. -576 с.
2. **Сервоприводы.** Основы, характеристики, проектирование. Издание 01/00//Практика приводной техники. Том 7. SEW Eurodrive.
3. **История** электротехники/под ред. И.А. Глебова.- М.: Издательство МЭИ, 1999.-524 с.
4. <http://www.mitsubishi-automation.ru>

УДК 621.18:62.52

Ю.С. ТВЕРСКОЙ, д.т.н., профессор;
М.М. ТВЕРСКАЯ, студент

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

Проблемы и задачи современной технологии создания многофункциональных систем управления на этапе маркетинга и закупки программно-технического комплекса

Аннотация. Рассматриваются особенности разработки концепции АСУТП энергоблоков и парадигма многокритериальной процедуры закупки ПТК, как

системообразующего изделия создания единой информационно-технологической среды эффективного управления.

Ключевые слова: многофункциональные АСУТП, концепция, программно-технический комплекс, технический аудит.

Yu.S. TVERSKOY, Doctor of Engineering, professor,
M.M. TVERSKAYA, student

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

Problems and challenges of modern technology create multifunctional systems management at the stage of marketing and purchasing program-technical complex

Abstract. Discusses features of the development of the concept of process control systems of power units and paradigm of multi-criteria procedures for the purchase of PTC, as a backbone of the product creating a unified information technology environment for effective management.

Key words: multifunctional process control, concept, program-technical complex, technical audit.

Современные системы компьютерного управления [1] объектов электроэнергетики, нефтехимии и других технологических систем представляют собой особый класс территориально-распределенных многофункциональных иерархически построенных АСУТП на базе программно-технических комплексов (ПТК) сетевой технической структуры.

Развитие теории и технологии этого класса сложных систем управления сталкивается с необходимостью решения ряда специфических междисциплинарных проблем и задач практически на всех стадиях жизненного цикла системы управления (рис.1).

Основная проблема, решаемая заказчиком: «Что и как надо сделать?», дабы избежать ошибок и недоразумений, возникающих уже на начальной стадии создания АСУТП в результате неоднозначного представления о будущей системе различными специалистами, определяется задачей формирования облика будущей системы [2].

В настоящее время технический облик АСУТП, как правило, определяется в виде технических требований или технического задания (технической части контракта). Однако для АСУТП мощных энергоблоков электростанций, характеризующихся большим информационным масштабом и сложными алгоритмами контроля и управления, указанные документы достаточно объемны и, соответственно, технический облик создаваемой системы получается «размытым» (основные концептуальные позиции скрыты за множественностью частных деталей). В этом случае целесообразно формирова-

ние технического облика создаваемой АСУТП в виде отдельного документа – концепции.

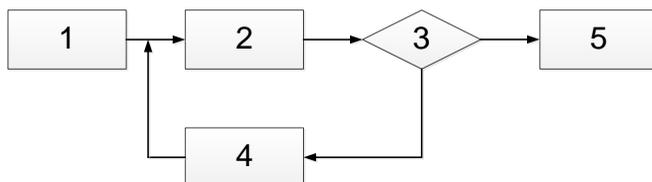


Рис. 1. Жизненный цикл системы управления [2]:
1 – формирование идеи, замысла, разработка концепции;
2 – проектирование; 3 – эксплуатация; 4 – модернизация; 5 – демонтаж

Разрабатываемая концепция должна отвечать требованиям перспективного развития системы в процессе ее жизненного цикла с целью обеспечения необходимой эффективности и конкурентоспособности. При этом ключевыми факторами создания сложной системы на начальной стадии сквозного проектирования являются, во-первых, выбор и закупка базового, интегрирующего в единую структуру подсистемы АСУТП, программно-технического комплекса, и, во-вторых, оценка рыночной стоимости создания системы, включая поставку ПТК и ввод в действие АСУТП («под ключ»).

Парадигма процедуры закупки ПТК связана при этом с формированием необходимых (требования нормативно-технических документов) и достаточных (конкурентоспособность) требований для обеспечения гарантированного функционирования автоматизированного объекта, и заключается в том, что достаточность условий и требований может быть определена только после ввода системы в работу, то есть на стадии штатной эксплуатации. Поэтому исключение из регламентов проводимых тендерных операций (закупка осуществляется по критерию минимума объявленной стоимости) этапа проведения экспертизы изделия (ПТК) надо считать необоснованным.

Экспертиза ПТК на предмет соответствия декларированных в технико-коммерческих предложениях (ТКП) характеристик средства компьютерного управления реальным должна проводиться путем соответствующего технического аудита как на заводе-изготовителе, так и на действующем объекте в структуре реальной АСУТП.

Надо отметить и технологическую сторону проблемы создания высокоточных систем управления гарантированной работоспособности, которая скрыта в закупках основного технологического оборудования и связана с экспертизой состояния и возможностью формирования полноценной «полевой зоны» (достаточность и представительность источ-

ников информации, их метрологическое обеспечение, качество исполнительных устройств и регулирующей арматуры).

В этом аспекте оценка управляемости объекта, в качестве которой служит экспертная оценка априорной подготовленности оборудования к реализации алгоритмов управления, очевидно, предопределяет непосредственно процедуру закупки оборудования.

Анализ структуры паушальных цен составляющих комплекса работ по созданию многофункциональной АСУТП наглядно дифференцирует рыночную стоимость сложной системы управления и характеризует дееспособность поставщика ПТК и АСУТП в различных аспектах.

Выводы

1. Показано, что задача закупки основного (ПТК для полномасштабной АСУТП, котельный агрегат, газовая и/или паросиловая турбина, генератор) оборудования энергоблоков ТЭС является многокритериальной процедурой.

2. Критерий стоимости системы является производным фактором необходимых и достаточных условий синтеза АСУТП и создания автоматизированного оборудования в целом энергоблока ТЭС и не может использоваться в качестве единственного критерия закупки.

Литература

1. **Методы** робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления. Учебник. / Под ред. д-ра техн. наук, проф. Н.Д. Егупова. – М.: Издательство МГТУ им. Баумана, 2002. -744 с..
2. **Теория** и технология систем управления. Многофункциональные АСУТП тепловых электростанций. В 3-х кн.: Кн. 1. Проблемы и задачи. Кн. 2. Проектирование. 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. – Кн. 1 – 260 с. – Кн. 2 – 436 с. – Кн. 3 – 176 с.

Тверской Юрий Семёнович,

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

Тверская Марина Максимовна,

НИУ «Высшая школа экономики», e-mail: kafsu@su.ispu.ru

УДК 681.3

Ю.В. НАУМОВ, старший преподаватель
Ю.С. ТВЕРСКОЙ, д.т.н., профессор

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

Аналитический метод синтеза регулятора

Аннотация. В настоящей работе развиваются частотные методы расчета автоматических систем регулирования (АСР). В теоретической основе разрабатываемого метода лежит теорема единственности операционного исчисления и метод регуляризации по А.Н. Тихонову, примененный для решения соответствующей некорректной задачи аппроксимации в частотной области.

Ключевые слова: АСУТП, непараметрический синтез, частотная аппроксимация.

Yu.V. NAUMOV, senior Teacher
Yu.S. TVERSKOY, Doctor of Engineering, professor

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

Analytical method of regulator synthesis

Abstract. In present article frequency methods of an automatic control systems calculation are developed. A theory of developed method is based on the unicity theorem of operational analysis and on A.N. Tihonov's regularization method applied on the corresponding non correct problem of an approximation in frequency domain.

Key words: process control system, nonparametric synthesis, approximation in frequency domain.

Эффективность современных АСУТП энергоблоков в значительной мере определяется точностью и качеством управления технологическими процессами и оборудованием. Поэтому совершенствование методов структурного и параметрического синтеза систем автоматического управления (САУ) является одной из наиболее острых актуальных проблем теории и практики [1].

Исходными данными задач синтеза служат, как известно, уравнения математической модели объекта управления $W_0(j \cdot \omega)$, а оптимальный алгоритм управления $W_p(j \cdot \omega)$ (закон регулирования) в общем случае неизвестен (рис. 1) [2-4].

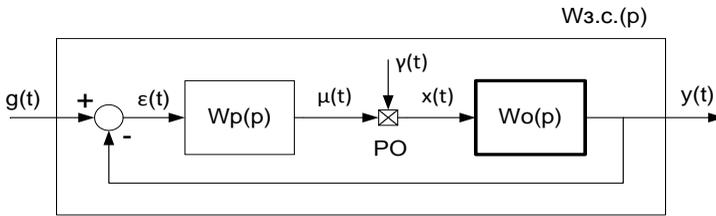


Рис. 1. Автоматическая система регулирования

Методы расчета промышленных автоматических систем регулирования, получившие широкое распространение, основываются на предположении известной математической модели объекта регулирования и заданного критерия качества АСР. Минимизацию критерия качества осуществляют при ограничениях на требуемый запас устойчивости замкнутой системы по корневому или частотному показателю колебательности [4]. Известные методики оптимизации разработаны, как правило, для ПИ-закона регулирования по линейному или обобщенному квадратичному интегральному критериям, которые во многих практических случаях не являются обоснованными. Например, в схемах регулирования подачи топлива и питательной воды проточных котлов [5]. При этом одна из возникающих трудностей расчета систем связана с необходимостью получения желаемого в аспекте технологических требований вида процессов, в частности, на границе апериодичности [5,6,7].

В настоящей работе сделана попытка развить частотные методы расчета автоматических систем регулирования (АСР) путем определения $W_p(j \cdot \omega)$ комплексно-частотной характеристика (КЧХ) оптимального алгоритма управления по математической модели объекта управления $W_0(j \cdot \omega)$ и оценке КЧХ $\hat{W}_{зс}(j \cdot \omega)$ оптимальной системы, полученной эвристическим путем на основе заданных переходных процессов в контуре управления (непараметрический подход).

В теоретической основе разрабатываемого метода лежит теорема единственности операционного исчисления [8] и метод регуляризации по А.Н. Тихонову [9], примененный для решения соответствующей некорректной задачи аппроксимации в частотной области [5,6,10].

Общая методология решения поставленной задачи алгоритмического синтеза регулятора включает следующие этапы.

1. Обоснование комплекса необходимых требований к синтезируемой замкнутой автоматической системе управления.

В результате формируем требуемый характер переходного процесса в замкнутой системе по каналам задания $h_g^y(t)$ и/или действия внутреннего возмущения $h_v^y(t)$ со стороны регулирующего органа.

2. Расчет оценки КЧХ $\hat{W}_{zc}(j \cdot \omega)$ оптимальной замкнутой системы.

В результате дополнительно определяем передаточные функции замкнутой системы по каналам задания $W_g^y(p)$ и/или внутреннего возмущения $W_v^y(p)$ путем решения многопараметрической задачи аппроксимации в частотной области [5,10].

3. Расчет оценки $\hat{W}_p(j \cdot \omega)$ КЧХ оптимального алгоритма управления.

В результате получаем оценку $\hat{W}_{p1}(j \cdot \omega)$ регулятора по каналу задания:

$$\hat{W}_{p1}(j \cdot \omega) = \frac{W_g^y(j \cdot \omega)}{W_o(j \cdot \omega) \cdot (1 - W_g^y(j \cdot \omega))}, \quad (1)$$

и оценку $\hat{W}_{p2}(j \cdot \omega)$ регулятора по каналу внутреннего возмущения:

$$\hat{W}_{p2}(j \cdot \omega) = \frac{1}{W_o(j \cdot \omega)} - \frac{1}{W_g^y(j \cdot \omega)}. \quad (2)$$

4. Обоснование физически реализуемой структуры регулятора с неопределенными параметрами настройки на основе графиков годографа КЧХ $\hat{W}_{p1}(j \cdot \omega)$, $\hat{W}_{p2}(j \cdot \omega)$ и аппроксимирующих $W_{p1}^a(p)$, $W_{p2}^a(p)$ оценок регулятора.

5. Параметрический синтез регулятора путем решения задачи аппроксимации в частотной области.

В результате получаем коэффициенты аппроксимирующей функции регулятора $W_p^a(p)$, приближающей в частотной области оценку оптимального регулятора $\hat{W}_p(j \cdot \omega)$.

В докладе приводятся примеры решения практических задач для котла мощного энергоблока.

Разработанная методология развивает основные положения частотных методов расчёта АСР [5, 6, 10] и позволяет выполнять структурный и параметрический синтез автоматических систем управления в соответствии с обоснованным комплексом требований.

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 им. В. И. Ленина». – Иваново, 2013. – Кн. 2 – 436 с.
2. **Красовский, А.А.** Аналитическое конструирование контуров управления летательными аппаратами. М.: Машиностроение, 1969.-240 с.
3. **Подкучаев, В.А.** Аналитические методы теории автоматического управления. – ФИЗМАТЛИТ, 2002.- 256 с.
4. **Ротач, В.Я.** Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами / В.Я. Ротач. – М.: Изд-во МЭИ, 2004. – 400 с.
5. **Тверской, Ю.С.** Автоматизация котлов с пылесистемами прямого вдувания. М.: Энергоатомиздат, 1996.-256 с.
6. **Тверской Ю.С., Таламанов С.А., Агафонова Н.А.** Методы интервальной оценки частотных характеристик и робастной настройки систем управления / Под общей ред. д-ра техн. наук проф. Ю.С. Тверского. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т им. В.И.Ленина, 2010. – 219 с.
7. **Бурцева, Ю.С.** Бесплоисковый метод расчета настроек регуляторов на минимум квадратичного критерия: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Москва. 2014. – 20 с.
8. **Агафонова, Н.А.** Математические основы частотных методов теории и практики автоматического управления: учебное пособие / Н. А. Агафонова, Ю. С. Тверской ; Федеральное агентство по образованию, ГОУВПО "Ивановский государственный энергетический университет им. В. И. Ленина"; под ред. Ю. С. Тверского. – Иваново, 2006. – 284 с.
9. **Тихонов, А.Н.** Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсенин. – М.: Наука, 1979. - 285 с.
10. **Тверской, Ю. С.** Методологические аспекты машинной аппроксимации частотных характеристик с оценкой меры адекватности моделей объектов управления / Ю. С. Тверской // Теплоэнергетика. – 1990. - № 11. – С. 34-39.

Наумов Юрий Владимирович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

Тверской Юрий Семёнович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: kafsu@su.ispu.ru

СЕКЦИЯ «МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ»

УДК 621.928

ЛЕБЕДЕВ С.А., студент, МИЗОНОВ В.Е., профессор
Ивановский государственный энергетический университет имени
В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Ячеечная модель нелинейной теплопроводности в стержне при протекании химической реакции

Аннотация. Целью работы является построение математической модели теплопроводности в стержне, в котором протекает химическая реакция. Модель основана на ячейчном представлении стержня и использует математический аппарат теории цепей Маркова. Реакция представлена реакцией первого порядка с температурозависимой постоянной скорости. Приведены некоторые результаты численных экспериментов с моделью.

Ключевые слова: теплопроводность, химическая реакция, ячейчная модель, распределение температуры.

LEBEDEV S.A., student,
MIZONOV V.E., Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin
Rabfakovskaya 34, 153003 Ivanovo
e-mail: mizonov46@ivanovo.ru

A cell model of non-linear heat conduction in a rod with chemical reaction

Abstract. The objective of the study is to build a mathematical model that describes temperature distribution in a rod, a chemical reaction occurs in which. The model is based on the cell presentation of the rod and uses the mathematical tools of the theory of Markov chains. The reaction is presented as the first order reaction with temperature dependent constant of its rate. Some examples of numerical experiments with the model are presented.

Key words: heat conduction, chemical reaction, cell model, temperature distribution.

Рассматривается задача о прогреве с торца теплоизолированного по остальной поверхности стержня, когда в стержне происходит химическая реакция термического разложения $A \rightarrow B$ с тепловым эффектом q_m [дж/кг]. Решение ищется на основе ячейчной модели, в которой стержень представлен m ячейками, а тепловое состояние –

векторами столбцами теплоты Q и температуры T . При отсутствии реакции эволюция распределения теплоты определена рекуррентным матричным равенством

$$Q^{k+1} = PQ^k, \quad (1)$$

где k – номер временного перехода продолжительностью Δt , P – трехдиагональная матрица теплопроводности с элементами $\lambda \Delta t / \Delta x^2$ на диагоналях, примыкающих к главной, где λ – коэффициент теплопроводности, Δx – длина ячейки. При известном векторе Q вектор T определяется по формуле $T = Q / (cp)$.

Теплообмен между открытым торцом и греющим газом описан формулой теплоотдачи

$$Q(m, k) = \alpha (T_g - T(m, k)) \Delta t, \quad (2)$$

где T_g – температура греющего газа, α – коэффициент теплоотдачи.

На каждом временном переходе в ячейках цепи действует нелинейный тепловой источник – теплота химической реакции. Его описание и введение в модель является задачей моделирования.

Не нарушая общности на данном этапе моделирования, предположим, что реакция имеет первый порядок, а ее кинетическое уравнение имеет вид

$$dC_A / dt = -k_A C_A, \quad (3)$$

где C_A – концентрация вещества A , k_A – постоянная скорости реакции, которая зависит от температуры процесса. Пусть эта зависимость носит пороговый характер, то есть до некоторой температуры T_0 реакция не идет вообще ($k_A = 0$), а при более высокой температуре (начиная с пороговой) справедлив закон Аррениуса. Тогда при $T > T_0$ она имеет вид

$$k_A = z_A e^{-\frac{E_A}{R(T-T_0)}} = z_A e^{-\frac{E_A}{R(T_g-T_0)} \frac{(T_g-T_0)}{(T-T_0)}} = z_A \beta^{\frac{(T_g-T_0)}{(T-T_0)}}, \quad (4)$$

где $\beta = e^{-\frac{E_A}{R(T_g-T_0)}}$, E_A – энергия активации.

Введем в качестве масштаба величину постоянной скорости при температуре газа

$$k_A(T_g) = z_A e^{-\frac{E_A}{R(T_g-T_0)}}. \quad (5)$$

Тогда температурная зависимость для постоянной скорости при $T > T_0$ примет вид

$$k_A(T) = k_A(T_g) e^{-\frac{E_A}{R(T_g-T_0)} \left(\frac{T_g-T_0}{T-T_0} - 1 \right)} = k_A(T_g) \beta^{\frac{(T_g-T_0)}{(T-T_0)} - 1}. \quad (6)$$

На основе разностной схемы для уравнения (2.23) запишем расчетное выражение для изменения концентрации после k -го перехода

$$C_A^{k+1} = C_A^k (1 - k_A(T_g) \beta^{\frac{(T_g-T_0)}{(T_g-T_0)} - 1} \Delta t), \quad (7)$$

которое позволяет рассчитать изменение массы вещества и поглощенную (эндотермическая реакция, $q_m > 0$) или выделившуюся теплоту (экзотермическая реакция, $q_m < 0$) и связанное с ней изменение температуры ячеек

$$\Delta T_{qj}^k = \frac{\Delta Q_{qj}^k}{c_j^k m_j^k} = -q_{mr} C_A^k \beta \left(\frac{T_j^k - T_0}{T_j^k - T_0} \right)^{-1}, \quad (8)$$

Где $q_{mr} = q_m k_A(T_g) \Delta t / c$ - приведенный тепловой эффект реакции, c - теплоемкость ячейки.

Выражения (7), (8) могут быть записаны в векторной форме и объединены с равенствами (1), (2), что даст полную модель теплопроводности с краевыми условиями 3-го рода и нелинейным источником теплоты, вызванным химической реакцией.

Пример расчета процесса для различной тепловой структуры реакции показан на рис. 1. Расчеты выполнены при $T_g = 1000^\circ\text{C}$, $\alpha = 20 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$, $\lambda = 1 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$, $z_A = .05$, $\beta = .2$, $T_0 = 100^\circ\text{C}$. Результаты представлены в виде графиков эволюции распределения температуры и степени завершения реакции.

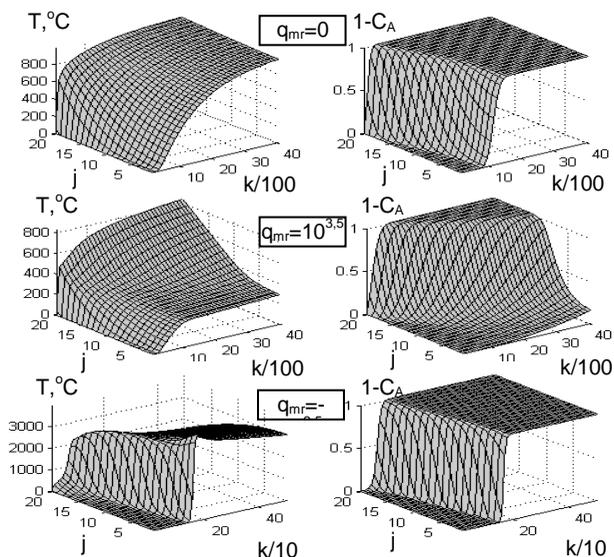


Рис. 1. Эволюция распределения температуры и концентрации реагирующего вещества при различно тепловом эффекте реакции

Верхняя пара графиков показывает эволюцию процесса при нулевом тепловом эффекте реакции. Реакция протекает достаточно быстро (так подобраны ее параметры) и завершается еще до полного

прогрева стержня до температуры газа.

Средняя пара графиков относится к эндотермической реакции с приведенным тепловым эффектом, показанным в поле рисунка. На графике температуры формируется почти горизонтальная площадка, где вся поступающая путем теплопроводности теплота расходуется на поддержание реакции. Тепловой процесс развивается гораздо медленнее по сравнению с предыдущим случаем, а в его конце значительная часть стержня содержит еще не прореагировавший материал.

Нижняя пара графиков относится к экзотермической реакции (время по оси x сокращено в 10 раз). Реакция протекает очень быстро, а стержень прогревается до температуры, заметно превышающей температуру греющего газа. После завершения реакции и прекращения тепловыделения стержень остывает до температуры греющего газа.

Таким образом, разработанная модель позволяет решать задачи теплопроводности с нелинейным источником теплоты, вызванным химической реакцией.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №15-08-01684.

Лебедев Сергей Алексеевич

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: lebedewserega@yandex.ru

Мизонов Вадим Евгеньевич

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail:mizonov46@mail.ru

УДК 621.926

А.Н. БЕЛЯКОВ*, к.т.н., докторант, В.П. ЖУКОВ*, д.т.н., профессор,
Т. WYLECIAL**, к.т.н., D. URBANIAK**, к.т.н.

*Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34 e-mail: zhukov-home@yandex.ru

**Ченстоховский политехнический институт, Польша, Ченстохово
e-mail:otwinowski@kkt.pcz.czyst.pl

Моделирование технологических систем измельчения сложной конфигурации на основе дискретных моделей уравнения Больцмана

Аннотация. Объектом исследования является струйная мельница кипящего слоя. Состояние дисперсной среды в мельнице описано уравнением Больцмана в фазовом пространстве «положение частицы – скорость частицы – размер частицы». Это позволяет описать транспорт, измельчение и классификацию частиц на единой математической основе. Результаты применения модели к описанию реального процесса позволили выявить особенности переработки дисперсной среды в различных секциях мельницы и найти рекомендации по совершенствованию процесса.

Ключевые слова: сыпучий материал, измельчение, классификация, замкнутый цикл, уравнение Больцмана.

Belyakov A.N.¹, CANDIDATE OF ENGINEERING,
ZHUKOV V.P.¹, DOCTOR OF ENGINEERING, PROFESSOR,
T. WYLECIAL², Candidate of Engineering,
D. URBANIAK², Candidate of Engineering.

¹Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin
Rabfakovskaya 34, 153003 Ivanovo,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

² Technical University of Chenstohowa, Poland,
e-mail: otwinowski@kkt.pcz.czest.pl

Modeling of milling circuits of complex configuration by means of discrete models of Boltzmann equation

Abstract. The object of investigation is an opposed fluidized bed jet mill. The state of particulate solids in the mill is described on the basis of Boltzmann equation written for the phase space “particle position – particle velocity – particle size”. It allows describing particle transportation, particle grinding and particle classification on the universal mathematical basis. The results of the model application to the real process allowed to find the features of particulate phase treatment in different sections of the mill and developing recommendations to improve the process.

Key words: granular material, grinding, classification, milling circuit, Boltzmann equation.

Ранее нами [1-3] в рамках дискретных моделей уравнения Больцмана предложена концепция описания совмещенных механических процессов в одном технологическом аппарате или одной его ступени. Технологические системы измельчения (ТСИ), как правило, включают несколько аппаратов, в каждом из которых протекает специфический набор совмещенных процессов. Описанию отдельных процессов и специфической их комбинации в отдельных аппаратах посвящен ряд наших ранних работ. В частности, совместное описание процессов движения и классификации частиц по крупности в аэродинамических классификаторах рассматривается в работе [1], описанию процессов движения и измельчения в шаровых барабанных мельницах посвящена работа [2], совмещенные процессы движения, измельчения и классификации в струйных мельницах кипящего слоя анализируются в работе [3]. При описании технологических систем, в которые включены несколько аппаратов, в каждом из которых совмещаются специфические для данного аппарата процессы, возникает проблема выбора определяющих координат для каждого аппарата и проблема согласования результатов расчета отдельных ступеней при их произвольном объединении в единую технологию. Решение указанных проблем и описание на основе дискретных моделей уравнения Больцмана технологических

систем измельчения сложной конфигурации представляет интерес как с научной, так и с практической точек зрения.

Целью работы является развитие концепции использования дискретных моделей уравнения Больцмана для описания технологических систем измельчения произвольной конфигурации, включающих аппараты с различной комбинацией совмещенных в них процессов.

Для достижения поставленной цели последовательно решаются следующие задачи:

- декомпозиция технологической системы измельчения на отдельные аппараты, для которых ранее выявлен и исследован набор протекающих в них совмещенных процессов;

- выбор определяющих координат, описывающих совмещенные процессы для каждой подсистемы;

- построение общего расчетного пространства системы из расчетных подпространств отдельных ее подсистем с указанием связей между ячейками расчетной области, согласование входных и выходных информационных потоков для выделенных ячеек;

- разработка алгоритма и средств его компьютерной поддержки для численных исследований совмещенных процессов, получение результатов численных экспериментов.

Предметом исследования являются совмещенные процессы в ТСИ, объектом исследования – струйная мельница кипящего слоя, в которой эти процессы реализуются.

Выбор в качестве объекта исследования струйных мельниц кипящего слоя [4] объясняется, с одной стороны, их широким использованием во многих отраслях промышленности и, с другой стороны, совмещением в данном аппарате нескольких технологических операций с разным набором в них совмещенных процессов.

Измельчение материала в струйной мельнице кипящего слоя происходит преимущественно за счет истирания частиц при их столкновении между собой и со стенками аппарата. Измельченные частицы выносятся потоком воздуха в гравитационную ступень классификатора, где происходит предварительное разделение частиц по размеру. После классификации крупные зерна возвращаются в размольную камеру, а мелкие частицы выносятся воздухом в следующую, центробежную ступень классификатора. После центробежной ступени мелкие частицы покидают аппарат, а крупные зерна возвращаются на повторное измельчение в размольную камеру.

В результате декомпозиции системы струйной мельницы выделены три подсистемы: размольная камера и две ступени классификации. При описании совмещенных процессов для каждой подсистемы выбираются определяющие координаты. Считается, что в размольной камере и гравитационной ступени классификации одновременно протекают процессы измельчения, движения и классификации частиц по крупности. В качестве определяющих координат для описания процес-

сов в этих подсистемах выбраны размер частиц, скорость частиц и высота положения частиц в слое.

В центробежной ступени классификации процесс протекает достаточно быстро, поэтому измельчение материала в ней практически отсутствует. Описание процесса классификации в центробежной ступени выполняется с использованием традиционной модели классификатора в виде кривой парциальных выносов [5]. В силу указанного выбора модели классификации в качестве определяющей координаты для центробежной ступени разделения рассматривается только размер частицы.

Возврат крупных частиц после классификации в центробежной ступени может направляться в разные части размольной камеры. Для иллюстрации возможностей предложенного подхода выполнен расчетный анализ совмещенных процессов в струйной мельнице кипящего слоя при различной структуре организации подачи возврата центробежной ступени в размольную камеру. Результаты расчетного анализа получены в виде изменения среднего размера зерен вдоль вертикальной оси размольной камеры. Анализ полученных зависимостей показывает, что крупные частицы преимущественно располагаются в нижних ячейках размольной камеры, что свидетельствует о наличии сегрегации частиц по размерам в кипящем слое. Кроме этого приведенные расчетные данные показывают, что сегрегация существенно снижается при подаче возврата в нижнюю часть размольной камеры.

Таким образом, предложенный подход позволил развить концепцию использования дискретных моделей уравнения Больцмана для описания совмещенных процессов в ТСИ произвольной конфигурации. Приведенный расчетный пример показывает возможные пути управления совмещенными процессами в струйных мельницах кипящего слоя.

Литература

1. **Беляков А.Н., Жуков В.П.** // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2012. Т. 55. Вып. 1. С. 108-111.
2. **Жуков В.П., Беляков А.Н.** // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2010. Т. 53. Вып. 11. С. 114-117.
3. **Жуков В.П., Мизонов В.Е., Беляков А.Н.** // Вестн. ИГЭУ. 2013. Вып. 6. С. 58-62.
4. **Fukunaka T., Golman B., Shinohara K.** // International Journal of Pharmaceutics. 2006. 311, p. 89-96.
5. **Мизонов В.Е. Ушаков С.Г.** Аэродинамическая классификация порошков. – М.: Химия. 1989.
6. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ «Расчет многомерных совмещенных процессов измельчения, классификации в сыпучих средах» № 2010612671 от 19 апреля 2010 года. Авторы: Беляков А.Н., Жуков В.П., Власюк А.А., Барочкин А.Е.

Беляков Антон Николаевич

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Жуков Владимир Павлович

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Wylicial T.

Technical University of Czenstohowa, Poland, e-mail: otwinowski@kkt.pcz.czest.pl

Urbaniak D.

Technical University of Czenstohowa, Poland, e-mail: otwinowski@kkt.pcz.czest.pl

УДК 620.9(063)

Д.А. ОСИПОВ, студент,
В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор; Д.А. УЛАНОВ, аспирант

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Компьютерное моделирование и оптимизация режимов работы оборудования ТЭЦ

Аннотация. Целью работы является разработка компьютерных моделей турбоагрегатов тепловых электрических станций и оптимизация на их основе режимов работы энергетического оборудования. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи: разработка компьютерных моделей энергетических характеристик турбоагрегатов, позволяющих определять удельные затраты тепловой энергии на выработку электрической энергии; решение задачи оптимального распределения нагрузки между турбоагрегатами.

Ключевые слова: тепловая электрическая станция, турбоагрегат, рабочий режим, распределение, оптимизация heat and power plant, turbo-unit, operating regime, distribution, optimization

OSIPOV D.A., student,
ZHUKOV V.P., Doctor of Engineering, professor,
ULANOV D.A., PhD student

Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin
Rabfakovskaya 34, 153003 Ivanovo, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Computer modeling and optimization of operating regimes of equipment at heat and power plant

Abstract. The objective of the work is to develop computer models of turbo-units of heat and power plants and optimization of operating regimes of energy equipment on their basis. The following problems are being solved to reach the objective: developing computer models of energy characteristics of turbo-units that allow determining the specific heat energy consumption to produce the electric power, and solving the optimization problem of optimal distribution of load over the turbo-units.

Key words: heat and power plant, turbo-unit, operating regime, distribution, optimization

Высокие темпы информатизации общества предполагают решение все большего числа практических задач с применением компьютеров. В энергетике описание и расчет режимов работы энергетического оборудования ведется с помощью энергетических характеристик, которые представлены на бумажных носителях в виде соответствующих альбомов графиков и таблиц. Для перевода этой информации в электронный вид в ЭВМ вводятся координаты ключевых узловых точек из этих альбомов. Одной из задач, которые решаются с помощью этих альбомов, является определение возможности функционирования энергетического оборудования в заданном технологическом режиме, то есть определение регулировочных диапазонов изменения различных режимных параметров, определенных энергетическими характеристиками. Другой задачей, стоящей перед энергетикой, является поиск и реализация оптимальных с точки зрения энергосбережения режимов работы оборудования. Поэтому задача оптимизации режимов работы энергетического оборудования, работающего в допустимой области функционирования, является актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

Целью работы является разработка компьютерных моделей турбоагрегатов тепловых электрических станций и оптимизация на их основе режимов работы энергетического оборудования.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- разработка компьютерных моделей энергетических характеристик турбоагрегатов, позволяющих определять удельные затраты тепловой энергии на выработку электрической энергии;
- решение задачи оптимального распределения нагрузки между турбоагрегатами на основании разработанных компьютерных моделей оборудования ТЭЦ.

Одной из проблем при компьютерном представлении энергетических характеристик является корректное задание области допустимых нагрузок энергетического оборудования, которая часто имеет сложную многомерную структуру. Пример области допустимых нагрузок для теплофикационной турбины представлен на рис. 1. Энергетические характеристики традиционно связывают удельные затраты тепловой энергии с нагрузкой турбины $q(N, Q_T, Q_P)$, где Q_T , Q_P – тепловая производственная и теплофикационная нагрузки соответственно; N – электрическая нагрузка турбоагрегата; q – удельный расход тепла брутто на выработку электроэнергии. При разработке компьютерной модели турбоагрегата сначала решается задача определения попадания точки с заданными значениями нагрузки на турбину (N , Q_T , Q_P) в область допустимых значений (см. рис.1). При условии попадания точки в рабочую область решается задача интерполяции, то есть определяется значение удельного расхода теплоты q для точки с заданными координатами N , Q_T , Q_P .

Для решения задачи попадания точки в заданную область последовательно решаются следующие задачи [1]:

- попадание точки в треугольную область на плоскости;
- попадание точки в треугольную пирамиду;
- попадание точки в куб;
- попадание точки в «усеченный куб», у которого отсутствуют одна, две или три произвольные вершины;
- попадание точки в пространственную область, заданную альбомом плоских допустимых областей (сечений) или альбомом энергетических характеристик (на примере турбоустановки).

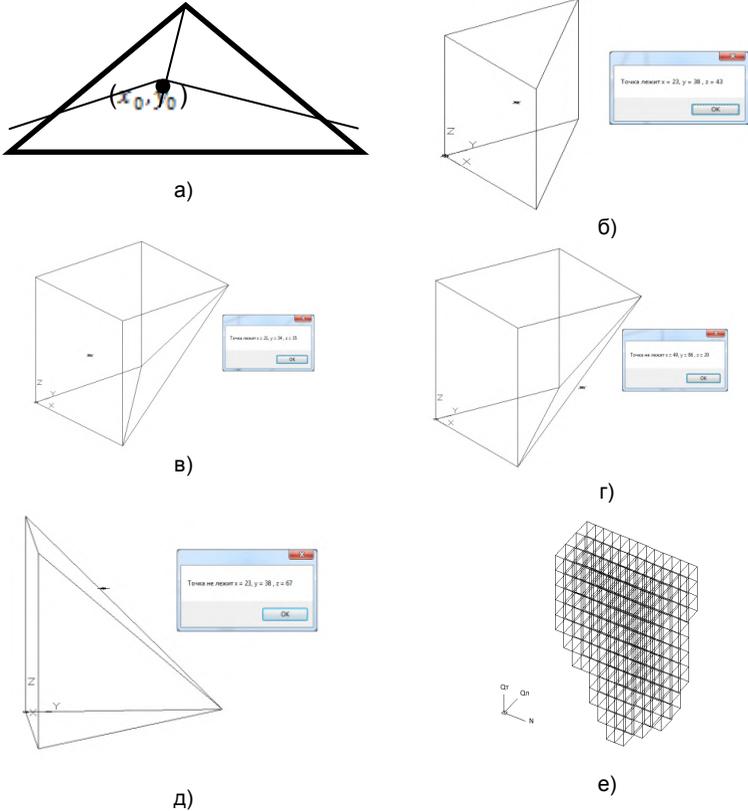


Рис 1. Расчетная схема задачи попадания точки в заданную область на плоскости (а) и в пространстве (б-е)

В основу алгоритма решения всех перечисленных задач положены известные соотношения векторной алгебры. Решение всех перечисленных задач реализовано в виде программного пакета, экранной формы которого для некоторых типов рассматриваемой области при-

ведены на рис. 1. Наибольший практический интерес представляет технологическая задача попадания точки в область заданную альбомом энергетических характеристик (рис. 1, е).

При условии попадания точки в заданную область при известных значениях показателей в узловых точках значение энергетических показателей в искомой точке определяется классическими методами интерполяции. Таким образом, определение по режимным параметрам значения энергетических показателей (q) при заданном режиме является компьютерной моделью энергетического турбоагрегата.

Полученные компьютерные модели турбоагрегатов позволяют сформулировать задачу по оптимальному распределению нагрузки между работающими турбоагрегатами ТЭЦ. Пусть заданы суммарные нагрузки на станцию N , Q_T , Q_n , которые нужно оптимально распределить между n турбоагрегатами с известными энергетическими характеристиками $q(N, Q_T, Q_n)$. В рассматриваемом примере выбираются одинаковые турбины ПТ80, рабочая область каждой из которых аналогична области представленной на рис. 1, е. Целевая функция оптимизации определяется как суммарное потребление всеми турбинами тепловой энергии, которое обеспечивает заданную нагрузку станции. При решении оптимизационной задачи определяются значения параметров оптимизации – тепловые и электрические нагрузки каждой турбины, которые обеспечивают минимальное значение целевой функции. Математическая формулировка задачи записывается следующим образом:

$$F_{ц} = \sum N_i q(N_i, Q_{Ti}, Q_{ni}) \rightarrow \min,$$

где индекс i – номер агрегата.

Суммарные значения тепловых и электрических нагрузок, которые необходимо распределить, заданы и записаны в виде ограничений:

$$N = \sum N_i; Q_n = \sum Q_{ni}; Q_T = \sum Q_{Ti}.$$

При этом ограничения нагрузок для каждой турбины определяются видом области допустимых значений (см. рис. 1)

$$N_i^{\min} \leq N_i \leq N_i^{\max}, Q_{Ti}^{\min} \leq Q_{Ti} \leq Q_{Ti}^{\max}, Q_{ni}^{\min} \leq Q_{ni} \leq Q_{ni}^{\max}.$$

Решение оптимизационной задачи выполнялось в два этапа. На предварительном этапе на ограниченной области поиска значений нагрузок был протестирован ряд существующих методов оптимизации с целью определения наиболее приемлемых методов. Отобранными на первом этапе методами на заключительном этапе решалась оптимизационная задача для всей рабочей области допустимых нагрузок.

На предварительном этапе решения для оптимизации распределения нагрузок пяти одинаковых турбоагрегатов ПТ были исследованы следующие методы: перебора; случайного поиска; Хука-Дживиса; покординатного спуска (на основе метода половинного деления); динамического программирования (по принципу оптимальности Беллмана) [2]. Практически одинаковые результаты решения оптимизационной задачи были получены всеми методами. Однако время, необходимое для решения задачи, для методов Хука-Дживиса и динамического программи-

рования оказалась на два порядка меньше по сравнению с остальными. На втором этапе оптимизации были использованы именно эти два метода.

Для каждого из выбранных методов подсчитаны временные затраты на получение решения, количество итераций и значение целевой функции в точке минимума. Суммарные распределяемые нагрузки составили: $N=270$ МВт; $Q_n=20$ Гкал/ч; $Q_r=260$ Гкал/ч.

Анализ результатов численных экспериментов показал преимущества по числу итераций и значению целевой функции метода Хука–Дживса по сравнению с методом динамического программирования.

Решение данной задачи позволяет эффективно определять оптимальные нагрузки энергетического оборудования и обеспечивать реализацию технологий, связанных с энергосбережением.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №15-08-01684.

Литература

1. **Осипов Д.А.**, Андреев А.А., Жуков В.П. К вопросу оцифровки энергетических характеристик оборудования для использования в программно-технических комплексах ТЭС/ Интеллектуальные энергосистемы: Труды II Международного молодёжного форума. т.1. –Томск, 2014–С.346-347.
2. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004.

Осипов Дмитрий Андреевич

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: dima-link@mail.ru

Жуков Владимир Павлович

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail:zhukov-home@yandex.ru

Уланов Денис Александрович

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

УДК 621.311.22

А. Н. РОСЛЯКОВ, аспирант, В.П. ЖУКОВ, д.т.н., профессор,
Г. В. ЛЕДУХОВСКИЙ, к.т.н., доцент, Е. В. БАРОЧКИН, д.т.н., профессор,

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Моделирование совмещенных процессов тепломасообмена в центробежных деаэраторах

Аннотация. Объектом исследования является центробежно-вихревой деаэратор, в котором в вихревом потоке осуществляется дегазация перегретой относительно температуры насыщения жидкости. Целью исследования является построение модели процесса. Считается, что процесс деаэрации осуществляется в три этапа: на первом этапе растворенные в воде газы переходят в парогазовые пузырьки; на втором этапе происходит дальнейшая дегазация за счет разности парциальных давлений растворенного газа в воде и в паре; на третьем этапе в зоне центробежной сепарации пузырьки пара отделяются от воды.

Ключевые слова: центробежный деаэратор, дегазация, парогазовый пузырь, парциальное давление, сепарация

ROSLYAKOVA.N., PhDstudent,
ZHUKOV.V.P., Doctor of Engineering, professor,
LEDUKHOVSKII, Dr.-Eng.,
BAROCHKINE.V., Doctor of Engineering, professor

Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin
Rabfakovskaya 34, 153003 Ivanovo. e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Modeling of combined processes of heat and mass transfer in centrifugal deaerators

Abstract. The object of investigation is the centrifugal vortex deaerator, in which degasification of overheated (with respect to the saturation temperature) liquid occurs. The objective of the study is to build a mathematical model of the process. It is supposed that deaeration does through three stages. At the first stage, the gases dissolved in water transit into the steam-gas bubbles. At the second stage, the further degasification goes due to the difference of particle pressure in water and steam. At the third stage, the steam bubbles are separated from water in the centrifugal separation zone.

Key words: centrifugal deaerator, degasification, steam-gas bubble, partial pressure, separation

Центробежно-вихревые деаэраторы конструкции Б.А.Зиминой [1, 2] широко используются в химической промышленности и энергетике благодаря удачному сочетанию высокой эффективности деаэрации и малых габаритов аппарата. Более широкое применение данных аппаратов во многом сдерживается отсутствием адекватных моделей сов-

мещенных процессов тепломассообмена, позволяющих проводить эффективное управление технологическими процессами. В связи с этим, работы, направленные на разработку моделей, методов расчета и эффективного управления этими процессами, приобретают особую актуальность как с теоретической, так и с практической точек зрения.

Для построения описания совмещенных процессов последовательно решаются следующие задачи:

- разработка модели начального эффекта процесса деаэрации [3,4], обусловленного мгновенным уменьшением давления в потоке деаэрируемой воды при ее входе в аппарат;

- разработка на основе термодинамического подхода модели формирования межфазной поверхности в вихревом потоке перегретой жидкости;

- разработка ячеечной модели деаэратора путем синтеза моделей его ступеней;

- проведение вычислительных экспериментов для сравнения полученных расчетных данных с результатами экспериментальных исследований.

Объектом исследования является центробежно-вихревой деаэратор конструкции Б.А. Зимина [1], в котором в вихревом потоке осуществляется дегазация перегретой относительно температуры насыщения жидкости. Предметом исследования является модель процесса деаэрации воды в центробежно-вихревом аппарате.

При построении модели считается, что процесс деаэрации осуществляется в три этапа: на первом этапе растворенные в воде газы переходят в парогазовые пузырьки за счет явления, получившего в литературе название «начальный эффект» [3]; на втором этапе происходит дальнейшая дегазация за счет разности парциальных давлений растворенного газа в воде и в паре; на третьем этапе в зоне центробежной сепарации обогащенные растворенными газами пузырьки пара отделяются от воды. В дальнейшем будем рассматривать процесс удаления из воды только растворенного кислорода, как наиболее коррозионно-активного газа.

На основании приведенных соображений и предварительных исследований [2] предложена трехступенчатая модельная схема аппарата. В первой ступени за счет резкого уменьшения давления происходит вскипание перегретой жидкости и образование пара. Часть растворенного кислорода в первой ступени переходит в паровую фазу за счет явления «начального эффекта». Затем смесь воды и пара поступает во вторую, транспортную ступень. Потом в третьей ступени осуществляется сепарация или разделение пара и воды. Пар с повышенным содержанием растворенного кислорода, двигаясь к центру, покидает аппарат через осевой патрубок, а вода, двигаясь от центра к периферии центробежной зоны, выводится из аппарата через тангенциальные патрубки. Расчетное пространство деаэратора определяется следующим набором координат: геометрическая координата z и дополнительная дискретная фазовая координата

ната Φ , вдоль которой откладываются дискретные значения, характеризующие тип теплоносителей в ступенях и его фазовое состояние: 1–пар; 2–вода; 3–газ в паровой фазе; 4–газ в воде. Для унификации алгоритма компьютерных расчетов двумерная расчетная область представляется в виде одномерного массива ячеек. Такое одномерное представление массива ячеек позволяет задачу произвольной размерности решать по единому алгоритму, указывая для каждой ячейки адреса ячеек возможных переходов и соответствующие вероятности этих переходов [5]. Состояние системы описывается одномерным вектором распределения вещества по выбранным ячейкам расчетного пространства $S=\{S_i\}$, где индекс i соответствует номеру ячейки. Алгоритм расчета искомого распределения S в произвольные моменты времени включает следующие этапы. Сначала для каждой ячейки фазового пространства определяются номера ячеек, с которыми она может взаимодействовать. Затем составляются уравнения теплового и (или) материального балансов для определения потоков энергии или вещества между этими ячейками. Известные потоки энергии и массы позволяют определить доли или вероятности переходов за рассматриваемый промежуток времени Δt . Суммирование потоков из всех ячеек в i -ю ячейку системы определяет ее состояние в следующий момент времени.

Для определения вероятностей переходов p_{ij} рассмотрим процессы, протекающие в каждой ступени аппарата более детально. При разработке модели аппарата принимаются следующие допущения:

- на первом этапе при снижении давления воды на входе в аппарат происходит дегазация воды за счет «начального эфффекта»;
- затем в соответствии с законом массопередачи и законом Генри [3] в ступенях 1, 2 и 3 осуществляется газообмен между деаэрируемой водой и парогазовыми пузырьками;
- в центробежном сепараторе с учетом существующих в промышленных аппаратах значений степени крутки потока (критерия Фруда) происходит идеальное разделение пара и воды: все парогазовые пузырьки двигаются к центру, а жидкость отбрасывается к периферии.

Численный пример решения задачи выполнен для следующих исходных данных: теплоемкость воды $c_2=4216$ Дж/кг К; удельная теплота парообразования $r = 2289600$ Дж/кг; плотность пара $\rho_n=0,418$ кг/м³; плотность воды $\rho_b=956,8$ кг/м³; температура насыщения $t_n=88,5^\circ\text{C}$. Рабочее пространство разделено на ячейки со следующими векторами значений фазовых координат: $z = [1\ 2\ 3]$; $\Phi = [1(\text{пар})\ 2(\text{вода})\ 3(\text{газ в паре})\ 4(\text{газ в воде})]$. Рабочий объем деаэратора разбит на 12 ячеек; номера ячеек с 1 по 3 относятся к пару; с 4 по 6 – к воде; с 7 по 9 – к газу в паровой фазе; с 10 по 12 – к газу в жидкой фазе. Подача пара в ячейку с заданным номером одновременно показывает и геометрическую координату точки подачи. На основании предварительных экспериментальных замеров, проведенных на установке ДЦВ-200 ФГУП ОмПО «ИРТЫШ» (г. Омск), начальная концентрация растворенного кислорода в деаэрируемой воде перед аппаратом

выбрана равной $C_{20}=2720$ мкг/кг. Расчетные исследования показали, что для рассматриваемого режима работы исследуемой установки при выбранном согласно [6] значении коэффициента массопередачи для кислорода

$k_m = 116$ мкг/(м²с), остаточное содержание растворенного кислорода, определенное по предложенной модели, составило 274 мкг/кг, а экспериментальные замеры показали соответствующее значение равное 288,7 мкг/кг. Относительная погрешность расчетных результатов составила 5,4%, что позволяет признать качество предложенной модели удовлетворительным. Проведенные расчетные исследования также показали, что в результате начального эффекта удаляется такое количество растворенного кислорода, которое приводит в дальнейшем не к десорбции растворенного кислорода из воды, а к абсорбции, т.е. поглощению водой растворенного кислорода в соответствии с уравнением массопередачи. При этом остаточное содержание растворенного кислорода в воде возрастает по сравнению с результатами расчета начального эффекта в первый момент времени. Отметим также, что известная из литературы эмпирическая зависимость для расчета начального эффекта, полученная для вакуумного струйно-барботажного деаэратора [3], дает существенно завышенные значения массовой концентрации растворенного кислорода после первой ступени. Однако и в этом случае за счет начального эффекта в пар переходит столько растворенного кислорода, что десорбция становится невозможной, т.е. остаточная концентрация растворенного кислорода в воде после первой ступени может только увеличиваться. В таком случае приходится признать неприменимость рассматриваемой эмпирической зависимости в рассматриваемых условиях.

В рамках дальнейшей работы планируется выполнить экспериментальные исследования, которые бы позволили разработать эмпирическое обеспечение модели и метода расчета во всем рабочем диапазоне изменения технологических параметров установки.

Литература

1. Патент РФ №2131555. Деаэратор. Зимин Б.А. Бюлл. № 22, 1999.
2. **Росляков, А.Н.** Анализ процесса дегазации в центробежно-вихревых деаэраторах/ А.Н. Росляков, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин, Б.А. Зимин, В.Н. Виноградов // Вестн. ИГЭУ. – 2014. – вып. 4. – С. 11-16.
3. **Шарапов В.И., Цюра Д.В.** Термические деаэраторы. // Ульянов. гос. техн. ун-т., 2003.
4. **Касаткин А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии.// М.: Химия, 1971.
5. **Жуков В.П., Барочкин Е.В.** Системный анализ энергетических теплообменных установок. // Иваново: ИГЭУ, 2009.
6. **Горшенин, С.Д.** Разработка эмпирического обеспечения ячеечной модели деаэрации воды в деаэраторных баках с затопленным барботажным устройством / С.Д.Горшенин, А.Ю. Ненаездников, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин // Вестн. ИГЭУ. – 2013. – вып. 5. – С. 9-13.

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».
Жуков Владимир Павлович
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru
Ледуховский Григорий Васильевич
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: lgv83@yandex.ru
Барочкин Евгений Витальевич
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: bar@ivenser.com

УДК 621.927

И.А. БАЛАГУРОВ, аспирант, В.Е. МИЗОНОВ, д.т.н., профессор,
Н. BERTHIAUX, Dr.-Eng., Prof.

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
EcoledesMinesd'Albi-Carmaux, Albi, France
E-mail: mizonov46@mail.ru, berthiau@enstimaс.fr

Структурирование загрузки компонентов в смеситель периодического действия

Аннотация. Целью исследования является поиск рациональной загрузки сегрегирующих компонентов в вибрационный смеситель периодического действия. При обычной загрузке компонентов в два слоя их перемешивание требует много времени, а смесь получается не вполне однородной из-за сегрегации. Послойная загрузка требует больше времени, но сокращается время перемешивания и негативное влияние сегрегации. Послойная загрузка исследовалась экспериментально на специальном лабораторном стенде. Было показано, что может быть достигнута высокая точность позиционирования слоев.

Ключевые слова: сыпучий материал, смешивание, сегрегация, структурированная загрузка, экспериментальное исследование

BALAGUROVI.F.¹, PhDstudent,
MIZONOVV.E.¹, Doctor of Engineering, professor,
Berthiaux H.², Doctor of Engineering, professor

¹Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin
Rabfakovskaya 34, 153003 Ivanovo, e-mail: mizonov46@mail.ru
²EcoledesMinesd'Albi-Carmaux, Albi, France

Structuring of the components load in a batch mixer

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, mixing, segregation, structured load, experimental investigation.

Процессы смешивания сыпучих материалов широко распространены в химической, строительной и машиностроительной отрасли. В частности, при производстве композитных материалов для ядерной энергетики, а так же при изготовлении высококоэрцитивных постоянных магнитов. Во многих технологических процессах, где нет потребности в непрерывных операциях с продуктами смешения, предпочтение отдается смесителям периодического действия.

Большое распространение получили периодические смесители вибрационного действия. В классическом варианте (рис. 1) они представляют собой камеру 1, в которую загружают компоненты смеси, вибратор 2, пружины 3 и основание 4. В камеру 1 загружают компоненты смеси, и в результате вибровоздействия на нее происходит перемешивание.

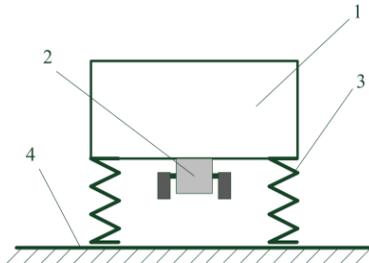


Рис. 1. Схема классическоговибросмесителя: 1 – камера для загрузки компонентов, 2 – вибратор, 3 – пружины, 4 – основание

Однако эта конструкция не лишена недостатков. В процессе работы вибросмесителя неминуемо возникает сегрегация. Частицы более мелкого размера стремятся занять положение у основания смесительной камеры под действием силы тяжести. В это же время более крупные частицы выталкиваются более мелкими в противоположном от основания направлении. Происходит расслоение компонентов смеси.

Чтобы избежать влияния сегрегации, было предложено загружать компоненты смеси последовательными слоями [1]. Принципиальная проверка этого подхода была выполнена на лабораторной установке (рис. 2). Она состоит из двух направляющих 1 и питателя 2 с подвижной перегородкой 3. К питателю 2 присоединена направляющая каретка 4.

Результаты экспериментов представлены на рис. 3. В каждом из экспериментов перегородка в питателе занимала среднее положение.

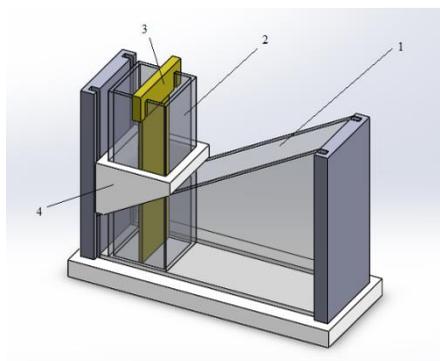


Рис. 2. Плоская модель питателя:
1 – сменные направляющие стёкла (с углом 10, 15 и 30 градусов);
2 – питатель; 3 – подвижная перегородка; 4 – направляющая каретка



а)



б)



в)

Рис. 3. Результаты экспериментов: а – соль/пшено, угол 10°; б – соль/пшено, угол 15°; в – пшено/гречневая крупа, угол 30°

Как видно из рис. 3, а-б, компоненты смеси при движении питателя вверх вдоль направляющих равномерно укладываются слоями друг на друга, причем толщина слоя пропорциональна величине угла.

Описанная выше модель укладки компонентов является плоской. Дальнейшее совершенствование данной технологии заключается в закручивании по спирали направления движения питателя [1]. На рис. 4 представлена предлагаемая конструкция вибросмесителя со структурированной загрузкой. Смеситель состоит из смесительной камеры 1 со съемным днищем 2, внутри которого расположен стакан 3 с перфорированным дном. Внутри стакана 3 имеются подвижные перегородки 4 для регулировки долей компонентов. При вращении стакан 4

движется вдоль винта 5, укладывая компоненты через перфорированное дно слоями один на другой.

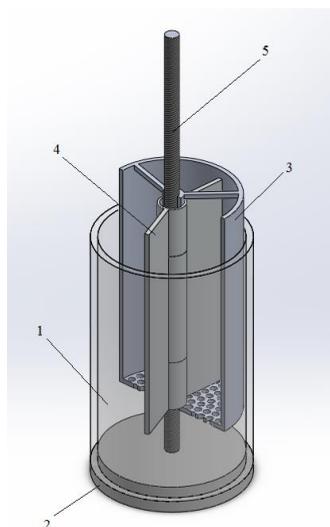


Рис. 4. Модель смесителя со структурированной загрузкой:
1 – смесительная камера; 2 – съемное днище;
3 – стакан с перфорированным дном; 4 – подвижные перегородки;
5 – винт

После структурированной укладки компонентов, смесительную камеру 1 подвергают краткосрочному воздействию вибрации для лучшего перемешивания.

Данная технология структурированной укладки позволяет сократить время работы установки и добиться лучшего качества смеси.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №15-08-01684.

Литература

1. Мизонов В.Е., Солопанова К.С., Баранцева Е.А. Пат. на полезную модель 127658 Российская Федерация, В 01 F 9/06. Вибрационный смеситель сыпучих материалов / опубл. 10.05.13, Бюл. 13. – 2 с.

Балагуров Иван Александрович

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: ibalagurov@bk.ru

Мизонов Вадим Евгеньевич

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: mizonov46@mail.ru

Berthiaux Henri

Ecole des Mines d'Albi-Carmaux, Albi, France, e-mail: berthiau@enstmac.fr

УДК 620.9(063)

А.В. МИТРОФАНОВ¹, к.т.н., доцент;
K. TANNOUS², Dr.-Eng., Prof.

¹Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
e-mail: and2mit@mail.ru
²University of Campinas, Brazil

Модель сопряженного тепло- и влагопереноса в энергетических установках с взвешенным слоем

Аннотация. Предложена ячеечная модель кипящего слоя, в котором наряду с псевдооживлением частиц происходят процессы и нагрева горячим газом и сушка частиц. Модель основана на теории цепей Маркова. Спецификой процесса и модели является то, что при сушке меняются свойства частиц и условия их ожигения. В результате этого высота слоя возрастает, а условия тепломассопереноса меняются. Модель учитывает эти особенности процесса. Приведены результаты численных экспериментов с моделью.

Ключевые слова: кипящий слой, тепломассоперенос, скорость витания, ячеечная модель, сушка, расширение слоя

MITROFANOVA.V.¹, Candidate of Engineering, Docent,
K. TANNOUS², Doctor of Engineering, professor

IVANOVO STATE POWER ENGINEERING UNIVERSITY NAMED AFTER V.I. LENIN
¹RABFAKOVSKAYA 34, 153003 IVANOVO,
E-MAIL: AND2MIT@MAIL.RU
²University of Campinas, Brazil

Modeling of combined heat and moisture transfer in power units with fluidized bed

Abstract. A cell mathematical model of fluidized bed, in which, together with fluidization, the processes of particles heating by the hot gas and particles drying occurs is proposed. The model is based on the theory of Markov chains. A feature of the process is that particle properties and conditions of fluidization are changed during drying. As a result of that the bed height and conditions of heat and mass transfer are changed. The model takes into account these features of the process. Some results of numerical experiments with the model are presented.

Key words: fluidized bed, heat and mass transfer, settling velocity, cell model, drying, bed expansion

В энергетике термическая обработка сыпучих материалов проводится в плотном слое, псевдооживленном слое, а также в режиме пневмотранспорта. При выбранном режиме максимальная движущая сила процесса достигается в условиях работы, близких к переходным из одного состояния слоя в другое. Вместе с тем в процессе обработки свойства частиц материала изменяются, что может приводить к нару-

шению технологического режима проведения процесса вплоть до полного его прекращения.

В этой связи поиск эффективных моделей процессов в плотном, в псевдооживленном слое и в режиме пневмотранспорта на единой методологической основе является актуальным. Ранее нами была предложена ячеечная математическая модель псевдооживления ансамбля частиц [1], позволяющая рассчитывать расширение слоя и распределение твердой фазы по его высоте. В настоящей работе предлагается развитие модели для решения задачи сопряженного тепло- и массообмена.

Модель имеет ячеечную структуру и включает в себя несколько параллельных цепей, между сходственными ячейками которых возможен обмен потоками теплоты и влаги. Расчетные схемы моделей плотного и взвешенного слоев показаны на рис.1. Эволюция состояния системы фиксируется через малые конечные промежутки времени Δt .

Продольное перемещение частиц и оживающего агента 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 $\mathbf{S}_p, \mathbf{S}_g$ – векторы-столбцы объемного содержания частиц и газа в ячейках, $\mathbf{P}_p^k, \mathbf{P}_g^k$ – матрицы переходных вероятностей для частиц и газа, зависящие от векторов состояния и меняющиеся на каждом переходе, \mathbf{S}_{gf} – вектор подачи газа.

Матрицы $\mathbf{P}_p^k, \mathbf{P}_g^k$ контролируют перенос вдоль цепей любого аддитивного свойства, связанного с частицами и газом, в частности, содержащейся в частицах теплоты и влаги.

Поперечный же перенос теплоты и влаги может быть описан обычными соотношениями тепло- и массоотдачи. В этом случае кинетика распределенного тепло- и массообмена в слое будет описываться матричными равенствами

$$\mathbf{M}_{wp}^{k+1} = \mathbf{P}_p^k (\mathbf{M}_{wp}^k - \mathbf{k}_w \cdot \mathbf{F}^k \cdot (\mathbf{p}_{ws}^k - \mathbf{p}_{wg}^k) \Delta t), \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_{wg}^{k+1} = \mathbf{P}_g^k (\mathbf{M}_{wg}^k + \mathbf{k}_w \cdot \mathbf{F}^k \cdot (\mathbf{p}_{ws}^k - \mathbf{p}_{wg}^k) \Delta t + \mathbf{M}_{wgf}), \quad (4)$$

$$\mathbf{Q}_p^{k+1} = \mathbf{P}_p^k (\mathbf{Q}_p^k + \alpha \cdot \mathbf{F}^k \cdot (\mathbf{T}_g^k - \mathbf{T}_p^k) \Delta t - r \mathbf{k}_w \cdot \mathbf{F}^k \cdot (\mathbf{M}_{ws}^k - \mathbf{M}_{wg}^k) \Delta t), \quad (5)$$

$$\mathbf{Q}_g^{k+1} = \mathbf{P}_g^k (\mathbf{Q}_g^k - \alpha \cdot \mathbf{F}^k \cdot (\mathbf{T}_g^k - \mathbf{T}_p^k) \Delta t + \mathbf{Q}_{gf}), \quad (6)$$

где \mathbf{Q} – вектор количеств теплоты в ячейках, \mathbf{T} – вектор температур, \mathbf{M}_w – вектор масс влаги, \mathbf{p}_{ws} и \mathbf{p}_{wg}^k – векторы парциальных давлений влаги на поверхности частиц и в газе, \mathbf{k}_w и α – векторы коэффициентов массоотдачи и теплоотдачи, \mathbf{F}^k – вектор поверхностей обмена в ячейках, оператор \cdot означает поэлементное умножение векторов. Векторы \mathbf{Q} и \mathbf{T}

связаны соотношением $\mathbf{Q} = \mathbf{T} \cdot \mathbf{c} \cdot \mathbf{p}$, где \mathbf{c} – вектор теплоемкостей влажных частиц и \mathbf{p} – вектор их плотностей.

Плотность частиц рассчитывается по соотношению

$$\rho^k = (M_w^k + \rho_p S_p^k) / S_p^k, \quad (7)$$

где ρ_p – плотность сухих частиц.

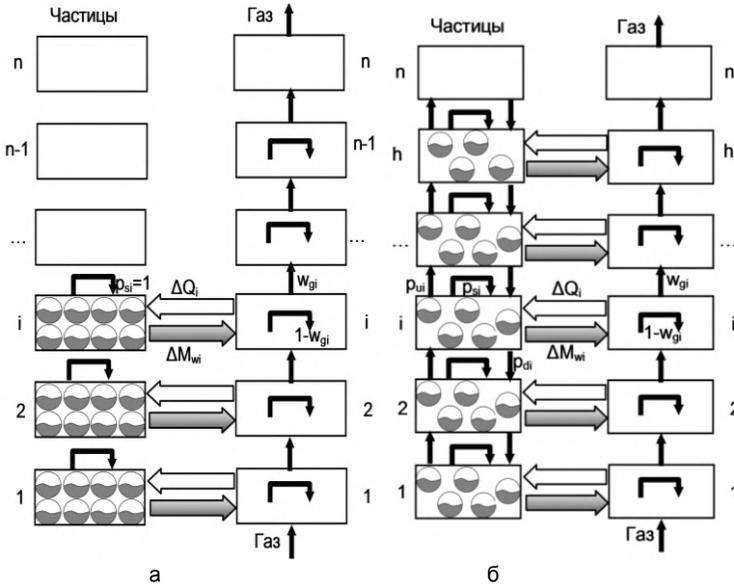


Рис. 1. Расчетные схемы моделей слоя:
а – плотный слой; б – взвешенный слой

При высокой пористости частиц и влагосодержании может происходить значительное изменение их плотности при практически постоянном диаметре, что приводит к уменьшению их скорости витания, что может приводить к дальнейшему расширению уже псевдооживленного слоя или переходу плотного слоя во взвешенное состояние. Таким образом, гидромеханическое состояние системы не является установившимся до полного высыхания всех частиц.

Рис. 2 иллюстрирует кинетику изменения влагосодержания в нижней и десятой ячейке слоя. В плотном слое влагосодержания в нижней и верхней (десятой) ячейках цепи заметно различаются, после перехода во взвешенное состояние их значения выравниваются. Кроме того, на рис. 2 приведены расчетные значения изменения влагосодержания частиц при сушке в плотном слое (при более низкой расходной скорости сушильного агента).

Таким образом, предлагаемая модель качественно непротиворечиво описывает процессы тепло- и массопереноса в слое, а также изменение гидродинамической ситуации, вызываемой этими процессами.

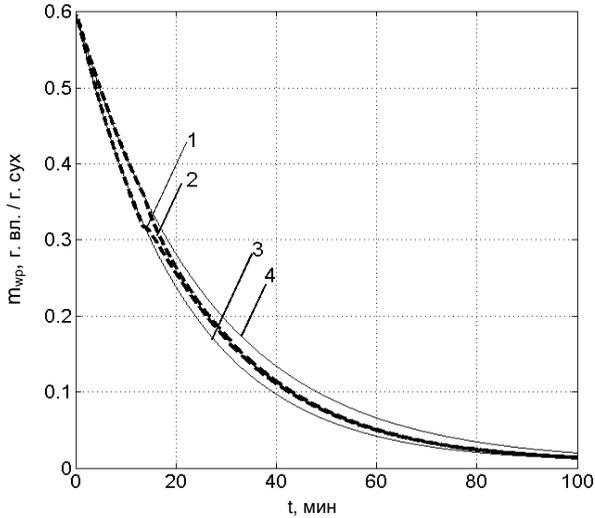


Рис. 2. Кинетика изменения влагосодержания частиц:

- 1 – нижняя ячейка псевдооживленного слоя; 2 – десятая ячейка ($i=10$) псевдооживленного слоя; 3 – нижняя ячейка плотного слоя; 4 – десятая ячейка ($i=10$) плотного слоя

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: An International Journal. – 2014. – Vol. 32 (2). – P. 171–178.

Митрофанов Андрей Васильевич

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: and2mit@mail.ru

Tannous Katia

University of Campinas, Campinas, Brazil, e-mail: katia@feq.unicamp.br

Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина
153003 г. Иваново, ул. Рабфаковская 34
e-mail: barantseva77@mail.ru

Влияние поперечной неоднородности потока на эффективность гравитационной классификации порошков

Аннотация. Предложена двумерная ячейчатая модель гравитационной аэродинамической классификации порошков по размеру частиц. Рабочий объем классификатора представлен двумерной сеткой ячеек. Из каждой ячейки возможны диффузионные переходы частиц во всех четырех направлениях и конвективные переходы вверх или вниз в зависимости от соотношения скорости витания и скорости восходящего потока газа, которая различна для разных столбцов ячеек. Переход из одного распределения частиц по ячейкам в другое описан матрицей переходных вероятностей. Итогом расчета является построение кривой разделения. Модель позволяет оценивать влияние неоднородности потока на эту кривую.

Ключевые слова: воздушная гравитационная классификация, ячейчатая модель, поперечная неоднородность газового потока, кривая разделения

SHUINAE.A., Doctor of Engineering, professor
IvanovoStatePowerEngineeringUniversitynamed after V.I. Lenin
Rabfakovskaya 34, 153003 Ivanovo, *e-mail: barantseva77@mail.ru*

Influence of crosswise flow non-homogeneity on the efficiency of gravity classification of powder

Abstract. A two-dimensional cell model of air gravity classification of size fractions of powder is proposed. The operating volume of classifier is presented as the two dimensional array of cells. The diffusion transitions of particles are allowed in all four directions, the convections transitions are allowed only in upward or downward direction depending on the relation of particle settling velocity and gas upstream velocity, which is different for different columns of the array. The transition of particle distribution over the cells from one state to another is described by the matrix of transition probabilities. The result of calculation is the grade efficiency curve. The model allows estimating the influence of the flow non-homogeneity on this curve.

Key words: air gravity classification, cell model, gas flow crosswise non-uniformity, grade efficiency curve

Основной задачей построения математической модели гравитационной классификации является построение кривой разделения – зависимости доли фракции, выносимой в целевой (мелкий) продукт разделения от ее размера. Обычно подобные модели строятся на основе аналитических решений дисперсионного уравнения [1]. Однако для получения аналитических решений этого уравнения необходимо принимать ряд допущений, не позволяющих проследить влияние фак-

торов, которые на самом деле оказывают существенное влияние на характеристики процесса.

Для описания процесса гравитационной классификации используется ячеечная модель, схематично представленная на рис.1. Классификатор разбит на $m \times n$ ячеек идеального смешения. Движение материала в классификаторе рассматривается через малые конечные промежутки времени Δt , в течение которых материал может переместиться только в соседние ячейки, но не далее. Исходный материал подает в ячейку с номером $(i1, j1)$. Через классификатор проходит газ со скоростью $W(j)$, соответствующей потоку в пустом (без частиц) аппарате и зависящей от номера ячейки. Крупность фракции исходного материала характеризуется ее скоростью витания v_s .

Матрица классификации \mathbf{P} , соответствующая схеме рис.1, представляет собой блочную матрицу, состоящую из $m \times m$ матриц размера $n \times n$, где n – число строк, а m – число столбцов в сетке ячеек. Главная диагональ этой матрицы содержит матрицы переходных вероятностей внутри столбцов. Диагональные переходные матрицы для переходов вперед и назад между столбцами расположены на диагоналях, смежных с главной диагональю. Все остальные внутренние матрицы \mathbf{Z} – нулевые матрицы размера $n \times n$. Таким образом, матрица \mathbf{P} имеет размерность $(nm) \times (nm)$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{12} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{Z} & \mathbf{Z} \\ \mathbf{P}_{21} & \mathbf{P}_{22} & \mathbf{P}_{23} & \dots & \mathbf{Z} & \mathbf{Z} \\ \mathbf{Z} & \mathbf{P}_{32} & \mathbf{P}_{33} & \dots & \mathbf{Z} & \mathbf{Z} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{Z} & \mathbf{Z} & \mathbf{Z} & \dots & \mathbf{P}_{m-1,m-1} & \mathbf{Z} \\ \mathbf{Z} & \mathbf{Z} & \mathbf{Z} & \dots & \mathbf{P}_{m,m-1} & \mathbf{P}_{mm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Эволюция состояния процесса классификации рассчитывалась по формуле

$$\mathbf{S}^{k+1} = \mathbf{P}\mathbf{S}^k, \quad (2)$$

где k – временного номер перехода, а \mathbf{S} – вектор состояния.

Элементы матрицы классификации: d_x, d_y , – безразмерные дисперсионные коэффициенты, характеризующие действие на частицы случайных факторов, а $v_y(j) = (w_y(j) - v_s)$ – безразмерная скорость движения.

По разработанной модели были проведены численные эксперименты, результаты которых представлены на рис. 2. Классификатор был разбит на 11×7 ячеек, исходная ячейка подачи (6,7). Исследованы три различные профиля скорости w (рис. 2, а). На рис. 2, б) представлены рассчитанные по модели кривые разделения для профилей w . Как и следовало ожидать, наилучшая эффективность разделения при данных параметрах процесса принадлежит равномерному распределению. При квадратичном и биквадратичном распределении эффективность разделения резко снижается.

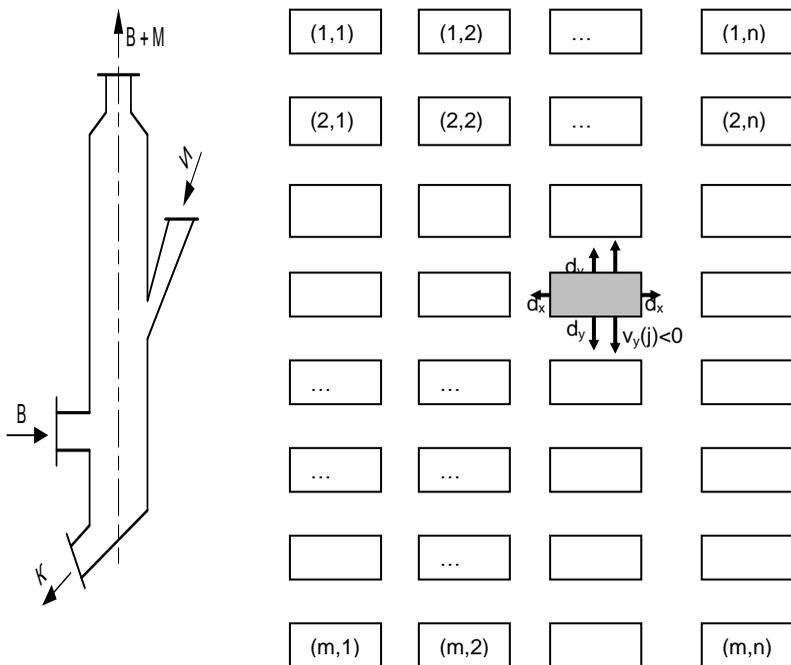


Рис. 1. Конструктивная схема гравитационного классификатора (В – воздух, И – исходный материал, К – крупный продукт, М – мелкий продукт), двумерная ячеечная модель рабочего объема и возможные вероятности переходов

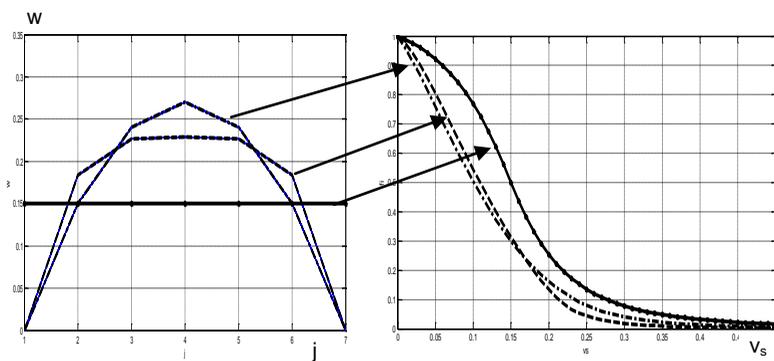


Рис. 2. Влияние профиля скорости (а) на лрвые разделения (б)

Таким образом, предложенная модель позволяет более детально учитывать аэродинамическую обстановку внутри классификатора и получать более точные расчетные прогнозы эффективности гравитационной классификации.

Литература

1. **Мизонов В.Е., Ушаков С.Г.** Аэродинамическая классификация порошков. – М: Химия, 1989. 169 с.
2. **Баранцева, Е.А.** Применение теории цепей Маркова к моделированию аппаратов с вихревыми газодисперсными потоками. / Е.А. Баранцева, С.М. Калинин, В.Е. Мизонов, Н. Berthiaux // XVIII Межд. Научн. Конф. «Математические методы в технике и технологиях ММТТ-18». Сб. трудов, т. 8, – Казань, – 2005, С. 242

Шуина Елена Александровна

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
e-mail: barantseva77@mail.ru

УДК 621.928

А.П. АЛЕШИНА, аспирант, М.А. ГРИЦЕНКО, аспирант,
А.М. ФАТАХЕТДИНОВ, студент, В.А. ОГУРЦОВ, профессор
Ивановский государственный политехнический университет
153023 г. Иваново, Иваново, ул. 8 марта, д.20.
e-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

Моделирование кинетики грохочения сыпучих материалов с высоким содержанием мелких фракций в исходном сырье

Аннотация. Предложена модель кинетики грохочения, основанная на теории цепей Маркова. Миграции частиц в слое описаны матрицей переходных вероятностей. Извлечение частиц из нижней ячейки цепи описано функцией источников. Зависимость доли извлеченных частиц от времени дает кинетику грохочения. Для экспериментального определения элементов переходной матрицы и верификации всей модели выполнены эксперименты на специально изготовленном вибрационном стенде. Идентификация элементов матрицы выполнена по локальным распределениям частиц в слое над ситом. Установлено хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных.

Ключевые слова: сыпучий материал, грохочение, цепь Маркова, кинетика извлечения, экспериментальная проверка

A.P. ALESHINA, PhDstudent, M.A. GRITZENKO, PhDstudent,
A.M. FATAKHETDINOV, student,
V.A. OGURTZOV, Doctor of Engineering, professor
Ivanovo State Polytechnic University 8-Marta, 20, 153023 Ivanovo
e-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

Modeling of the screening kinetics of granular materials with high content of fine fraction in raw stock

Abstract. A model of screening kinetics based on the theory of Markov chains is proposed. The matrix of transition probabilities describes the particles migration in the

layer above a screen. Extraction of fine particles from the bottom cell of the chain is described by the source function. Dependence of the part of extracted particles on time gives the kinetics of screening. Experimental investigations were done at the specially elaborated vibration set-up in order to identify the transition matrix entries and verify the model. Identification of the entries was done using the local distributions of particles in the layer above the screen. A good correlation between calculated and experimental data was found.

Key words: granular material, screening, Markov chain, extraction kinetics, experimental validation

В Ивановской области возрастает количество карьеров, где производится добыча нерудных строительных материалов (щебня, гравия, песка). Вновь разрабатываемые месторождения имеют низкое содержание валунов и гравия и высокое содержание песка (до 90%). Возникает необходимость переработки сыпучего сырья непосредственно в карьере, где происходит предварительное обогащение сыпучих смесей. Песок и гравий мелких фракций извлекается с помощью грохотов из общей добываемой массы, что позволяет снизить транспортные расходы на доставку сыпучего материала на дробильно-сортировочные заводы и уменьшить объем перерабатываемой массы.

Существующие в настоящее время методики расчета производительности грохотов и эффективности классификации, основаны на эмпирической информации, полученной в результате эксплуатации промышленных аппаратов, работающих как на стадии предварительной переработки сыпучего сырья, так на стадии товарного грохочения. Они не учитывают специфики процесса грохочения, если содержание мелких частиц в исходной смеси велико. В настоящее время для описания процессов в дисперсных средах применяются стохастические модели, использующие теорию цепей Маркова [1]. При моделировании грохочения используется гипотеза о линейности процесса, когда скорость сегрегации мелкой фракции к поверхности сита постоянна и не зависит от фракционного состава окружающего ее материала [2].

В настоящей работе предлагается нелинейная модель кинетики грохочения. Будем считать, что скорость сегрегации при перемещении мелких частиц к нижней границе слоя уменьшается. Это обусловлено тем, что мелкие частицы, находящиеся в поле силы тяжести, подвергаются случайным соударениям с крупными частицами сыпучей среды, что вызывает осредненное перемещение мелких частиц вниз. Через некоторое время происходит их скопление в нижних областях слоя сыпучего материала. Сегрегация мелких частиц в среде, где они находятся в избытке, замедляется.

Расчетная схема процесса представлена рис. 1 а. На рис. 1 б показана ячеечная модель процесса, в которой высота слоя разбита на m ячеек идеального перемешивания высотой $\Delta x = h/m$. Процесс протекает в дискретные моменты времени $t_k = (k-1)\Delta t$, где Δt – продолжительность, а k – номер временного перехода.

На рис. 1в показана симметричная диффузионная составляющая d и несимметричная составляющая v , обусловленная сегрегацией.

В каждый момент времени распределение содержания мелкой фракции по ячейкам характеризуется вектором-столбцом \mathbf{S}^k размером $m \cdot 1$. Эволюция этого вектора с течением времени описывается рекуррентным матричным равенством

$$\mathbf{S}^{k+1} = \mathbf{P} \cdot \mathbf{S}^k, \quad (1)$$

где \mathbf{P} – матрица переходных вероятностей, которая имеет вид:

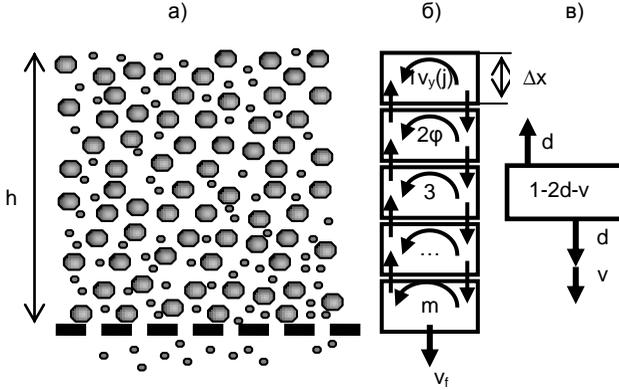


Рис. 1. Расчетная схема процесса (а), его ячеечная модель (б) и доли переноса фракции из ячейки (в)

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{s1}^k & p_{u2}^k & 0 & \dots & 0 & 0 \\ p_{d1}^k & p_{s2}^k & \dots & \dots & 0 & 0 \\ 0 & p_{d2}^k & \dots & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & p_{s(m-1)}^k & p_{um}^k \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{d(m-1)}^k & p_{sm}^k \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где p_{ui}^k – вероятности перейти в течение Δt в верхнюю соседнюю ячейку, p_{di}^k – вероятности перейти в течение Δt в нижнюю соседнюю ячейку и p_{si}^k – вероятности в течение Δt остаться в данной ячейке.

В соответствии с принимаемыми допущениями эти вероятности рассчитываются по следующим формулам:

$$p_{ui}^k = d = \text{const}, \quad (3)$$

$$p_{di}^k = d + v_0(1 - S_{i+1}^k), \quad (4)$$

$$p_{si}^k = 1 - p_{ui}^k - p_{di}^k, \quad (5)$$

где v_0 – начальная скорость сегрегации мелкой фракции, а множитель $(1 - S_{i+1}^k)$ учитывает замедление сегрегации по мере заполнения следующей ячейки мелкой фракцией.

Выход мелкой фракции в подрешетный продуктописывается за пределами матрицы \mathbf{P} . Пусть на каждом временном переходе после воздействия на вектор состояния \mathbf{S}^k матрицей \mathbf{P} из нижней ячейки цепи выводится доля v_f^k содержащейся в ней мелкой фракции, то есть ее выход составляет

$$q^{k+1} = S_m^{k+1} v_f^k, \quad (6)$$

а оставшаяся в ней доля мелкой фракции равна

$$S_m^{k+1} := S_m^{k+1} (1 - v_f^k). \quad (7)$$

Кинетика извлечения фракции за $(k+1)$ переход рассчитывается по формуле

$$\epsilon^{k+1} = \sum_0^{k+1} q^{k+1}. \quad (8)$$

Для исследования миграции мелких частиц по виброоживленному слою и извлечения их из бинарной смеси в подситовое пространство была создана лабораторная установка, представляющая собой плоский экран из прозрачных пластин, имеющий жесткий кинематический вибропривод (рис. 2). Опыты проводились при следующих параметрах вибровоздействия рабочего органа на слой материала: частота колебаний рабочего органа – 15 Гц, амплитуде колебаний - 10 мм. Начальная концентрация мелких частиц в смеси составляла 50%. Число ячеек принималось $m=4$. В начальный момент времени мелкие частицы были сосредоточены в двух верхних ячейках. Число временных переходов – 300 ($\Delta t=0,2$ с). Размер отверстия сита составлял 8 мм.

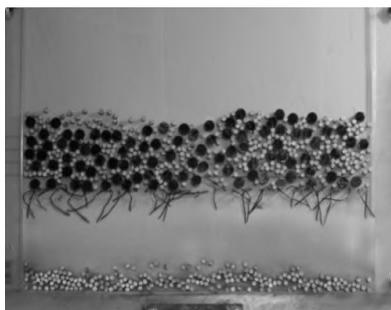


Рис. 2. Лабораторная установка для периодического грохочения бинарной смеси частиц

На рис. 3 представлены опытные и расчетные данные эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя и относительное количество их извлечения в подситовое пространство.

Идентификация расчетных и экспериментальных данных извлечения мелких частиц позволила определить безразмерные стохастические параметры модели (коэффициент диффузии, начальная скорость

сегрегации, скорость проникновения частиц через отверстия сита). Они составили $v_0=0,026$, $d=0,005$, $v_f= 0,21$.

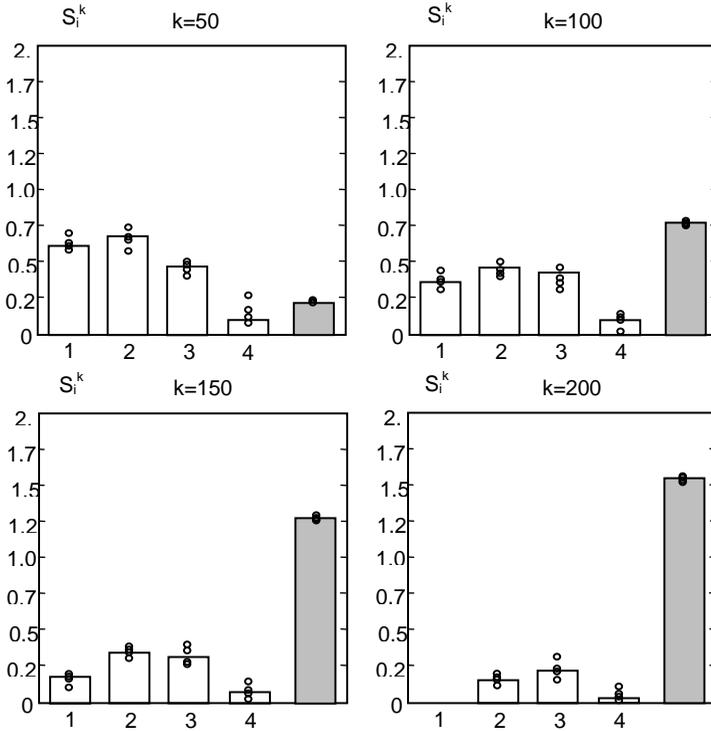


Рис. 3. Опытные и расчетные данные эволюции распределения содержания мелкой фракции по высоте слоя и степень их извлечения в подситовое пространство

Удовлетворительное совпадение расчетных и опытных данных подтвердило правомерность применения нелинейной модели, что позволяет положить ее в основу инженерного метода расчета промышленного грохочения.

Литература

1. Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology. *PowderTechnology* 157 (2005) 128-137.
2. Огурцов В.А., Федосов С.В., Мизонов В.Е. Моделирование кинетики виброгрохочения на основе теории цепей Маркова // *Строительные материалы*. – 2008. - № 5. – С. 33 – 35.

Алешина Анна Павловна

ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,
e-mail: annaricci89@mail.ru

Гриценко Михаил Алексеевич

ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,
Фатахтдинов Артем Мяскутович

ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,
e-mail: fthtdnv@mail.com

Огурцов Валерий Альбертович

ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,
e-mail: ogurtzovvawork@mail.ru

УДК 551.511.61::004.032.26

В.В. ПЕКУНОВ, д.т.н.

153008 г. Иваново, ул. Колесанова 2-57

E-mail: pekunov@mail.ru

Локальные нейросетевые модели турбулентности

Аннотация. Предложены локальные нейросетевые модели турбулентной вязкости. Не исключено, что модели являются аппроксимациями аналитического решения некоего дифференциального уравнения для турбулентной вязкости или даже системы уравнений, о чем косвенно свидетельствует наличие в модели двух нелинейных слоев. Такие модели могут применяться для быстрых приближительных расчетов, а также для инициализации полей турбулентной вязкости при использовании однопараметрических моделей турбулентности.

Ключевые слова: нейронная сеть, турбулентная вязкость, численный эксперимент.

PEKUNOV.V., Doctor of Engineering

Kolesanova 2-57, 153008 Ivanovo, *e-mail: pekunov@mail.ru*

Local neural networks models of turbulence

Abstract. Local neural network models of the turbulent viscosity are proposed. It is possible, that the models represent approximation of analytical solution to a differential equation for the turbulent viscosity, or even for a set of equations that implicitly follows from the presence in the model of two non-linear layers. Such models can be used for fast approximate calculations and for initialization the turbulent viscosity fields for one-parametric models of turbulence.

Keywords: neural network, turbulent viscosity, numerical experiment

Турбулентность является одним из важнейших факторов при моделировании течений жидкости и газа как в природе, так и в промышленности. Хорошо известны два основных класса моделей турбулентности – локальные (Прандтля, Кармана и другие), характеризующиеся простотой, однако, при невысокой точности, и интегральные (Абрамовича-Секундова, Спаларта-Аллмараса, К-Е, К-В и другие), отличающи-

еся сложностью, но позволяющие достаточно точно рассчитывать не-тривиальные турбулентные течения путем решения одного или нескольких дифференциальных уравнений для турбулентной вязкости или энергии пульсаций, масштабов вихрей и иных характеристик.

Представляется интересным поиск потенциально более точных (по сравнению с известными) локальных моделей, базирующихся, например, на математическом аппарате нейронных сетей.

Для экспериментов была выбрана *трехслойная нейронная сеть* прямого распространения с 7 нейронами в первом слое, с 5 нейронами во втором и с одним нейроном в третьем. Передаточные функции первых двух слоев – *гиперболический тангенс*, последний слой – *линейный*. Выход сети интерпретировался как значение турбулентной вязкости. Количество входов варьировалось от одного до четырех. На входы подавались, соответственно, значения:

а) квадрата минимального расстояния L_{\min}^2 до ближайшей твердой стенки;

б) оценки турбулентной вязкости, рассчитываемой как $L_{\min}|\bar{U}|$,

где $\bar{U} = (\bar{U}_1, \bar{U}_2, \bar{U}_3)$ — вектор скорости течения;

в) функции деформации $\sqrt{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)}$;

г) функции вращения $\sqrt{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2}$.

При обучении сети использовались данные, полученные с помощью модели турбулентности К-Е (RNG) в трехмерной расчетной области сложной формы, представляющей участок, включающий улицу Göttinger Straße города Ганновер (Hannover, Германия, 52°20' северной широты, 9°40' восточной долготы) и несколько примыкающих улиц. Имеющиеся данные представляли результаты моделирования с установившимися значениями полей скорости и турбулентной вязкости, полученные для 18 различных направлений ветра (от 20 до 360 градусов с шагом в 20°). Для обучения брались данные для направления ветра в 20° относительно направления на север. Использовался метод обратного распространения ошибки. Объем обучающей выборки равнялся количеству узлов расчетной сетки (72×86×45). Для проверки адекватности получаемых нейросетевых моделей использовался дисперсионный анализ с критерием Фишера при уровне значимости 0,01.

В таблице приведены результаты экспериментов.

Таблица. Результаты обучения нейронной сети

N	F_{CALC}	F_{TABL}	Абсолютные величины		
			D	σ	δ
1	0,204	1,478	1,754	1,325	8,49
2	0,131	1,449	1,125	1,061	9,858
3	0,094	1,425	0,818	0,901	8,307
4	0,089	1,404	0,763	0,873	6,627

Здесь N – количество входов сети, F_{CALC} – расчетное значение критерия Фишера, F_{TABL} – табличное значение критерия Фишера, D – дисперсия, σ – стандартное отклонение, δ – максимальное по модулю отклонение. Как показал дисперсионный анализ, все модели являются *адекватными*, наиболее же точна модель с 4 входами, то есть, учитывающая все вышеперечисленные входные функции.

Интересной представлялась проверка модели в той же расчетной области для иных направлений ветра, нежели при обучении. Соответствующие эксперименты были проведены, результаты сравнения даны на графиках (рис. 1 и 2).

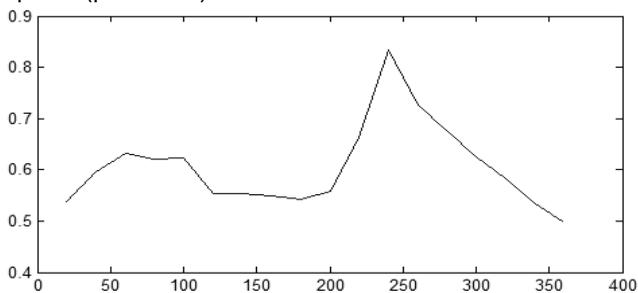


Рис. 1. Стандартное относительное отклонение в зависимости от направления ветра (в градусах)

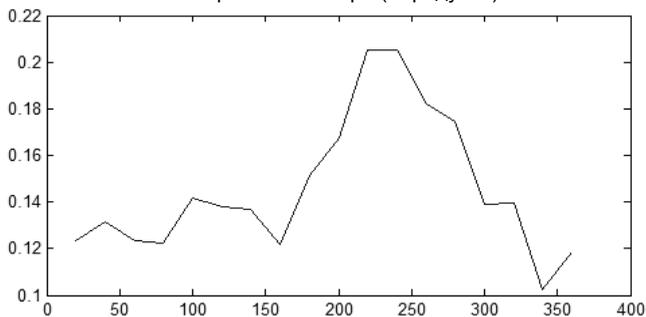


Рис. 2. Среднее относительное отклонение в зависимости от направления ветра (в градусах)

Очевидно, что отклонения вполне приемлемы. Пик погрешности отмечается вблизи направлений ветра около 220° . Такой результат не случаен, поскольку нейронная сеть, обученная по другому направлению ветра (220°) дала очень схожие графики отклонений с тем же характерным пиком. Косвенно этот факт подтверждает объективность, выражающуюся в наличии определенных закономерностей, построенной модели. Вероятно, вышеуказанный пик объясняется отсутствием учета в текущей модели каких-либо важных факторов генерации или диссипации турбулентности.

Итак, в данной работе предложены локальные нейросетевые модели турбулентной вязкости. Не исключено, что модели являются аппроксимациями аналитического решения некоего дифференциального уравнения для турбулентной вязкости или даже системы уравнений, о чем косвенно свидетельствует наличие в модели двух нелинейных слоев. Такие модели могут применяться для быстрых приблизительных расчетов, а также для инициализации полей турбулентной вязкости при использовании однопараметрических моделей турбулентности. Интересной также представляется идея ускорения расчета путем совместного использования интегральных и нейросетевых моделей, где нейронная сеть могла бы использоваться в тех блоках расчетной области, где ее погрешность потенциально невелика, например, в зонах с простой геометрией без возвратных течений.

Пекунов Владимир Викторович
e-mail: pekunov@mail.ru

АВТОРСКИЙ ИНДЕКС

А

АЙЕ МИН ЛАТТ.	96
АЛЕШИНА А.П.	326
АНДРЕЕВ С.В.	161, 167
АНДРЮШИН А.В.	239
АНДРЮШИН К.А.	11
АНТОНИШИН И.В.	263

Б

БАЕВА М.Н.	118
БАЛАГУРОВ И.А.	315
БАННИКОВ А.В.	144
БАННИКОВА С.А.	121
БАРОЧКИН А.Е.	34
БАРОЧКИН Е.В.	3, 311
БЕЛЯЕВА О.В.	152
БЕЛЯКОВ А.Н.	302
БУГРОВ М.А.	58
БУДАЕВА А.Ю.	78, 92, 102
БУРОВ В.Б.	14
БУХМИРОВ В.В.	125, 129 133, 136 140, 197 201
БУШУЕВ Е.Н.	82, 85, 89
БУШУЕВА Н.В.	85
БЫКОВ Е.П.	267

В

ВАСИЛЬЕВ С.В.	144
ВИНОГРАДОВ А.Л.	30, 37
ВОЛЬМАН М.А.	54
ВОРОШИЛОВ О.А.	18

Г

ГАБИТОВ Р.Н.	216
ГАВРИЛОВА С.В.	285
ГАСЬКОВ А.К.	125
ГОЛУБЕВ А.В.	231, 252
ГОЛУБЕВ В.А.	235
ГОРБУНОВ В.А.	51, 213
ГОРДЕЕВ А.А.	75
ГОРДИЛОВСКИЙ А.А.	277
ГОРИНОВ О.И.	195, 204 216
ГОРШЕНИН С.Д.	22
ГРАЖДАНОВ А.А.	75
ГРИГОРЬЕВ Е.Ю.	41
ГРИЦЕНКО М.А.	326
ГРИЦЕНКО А.В.	263

Д

ДЕМИН А.М.	68
ДОЛИНИН Д.А.	210
ДОМАНОВ А.В.	281
ДОМАНОВ В.И.	281, 285 288
ДУНАЕВ В.А.	51

Е		КОПКОВ М.В.	155
ЕГОРОВА К.О.	252	КОРОЛЬКОВ Д.А.	171
ЕГОШИНА О.В.	96	КОРОТКОВ А.А.	22
ЕРЕМИНА Н.А.	92, 102	КОСТЕРИН А.Ю.	140
Ж		КРАСНОВ А.А.	37
ЖУКОВ В.П.	3, 302 306, 311	КУЗЬМИН Р.Д.	174
З		Л	
ЗАЙЦЕВА Е.В.	99	ЛАВРЕНТИЧЕВ Д.В.	274
ЗАХАРОВ В.М.	121, 148	ЛАПАТЕЕВ Д.А.	148
ЗАХАРОВА Е.В.	267	ЛАРИН А.Б.	106, 110
ЗЕЗЮЛЬКИН Г.Г.	277	ЛАРИН Б.М.	92, 114
ЗИМИН А.П.	3	ЛЕБЕДЕВ С.А.	299
И		ЛЕДУХОВСКИЙ Г.В.	3, 22
ИЛЬИН Р.А.	118	ЛЕДУХОВСКИЙ Г.В.	26, 311
ИЛЬЧЕНКО А.Г.	48, 58	ЛОГИНОВ В.В.	181
ИППОЛИТОВ В.А.	152, 155	ЛОНШАКОВ Н.А.	51
К		М	
КАРПУХИН К.Е.	288	МАКАРИЩЕВА Н.А.	96
КАРПЫЧЕВ Е.А.	78	МАЛКОВА Е.Л.	72
КИЕТ С.В.	239	МАЛЫШЕВ Е.В.	177
КИСЕЛЕВ А.И.	30, 37	МАРТЫНОВ А.В.	181
КЛЮКВИН В.В.	158	МАРШАЛОВ Е.Д.	260
КОЛЕСОВ И.А.	231	МАХОВ О.Н.	177
КОЛИБАБА О.Б.	213, 216	МЕРЗЛИКИНА Е.И.	239, 256
КОНДРАШИН А.В.	61	МИЗОНОВ В.Е.	299, 315
КОНОВАЛОВ А.В.	161, 167 190	МИТРОФАНОВ А.В.	319
		МОИСЕЕВ А.Н.	155
		МУРАВЬЕВ И.К.	270
		МУРЗАКОВ Д.Г.	281

Н

НАУМОВ Ю.В.	295
НИКИТИНА И.С.	239
НИКИШОВ В.Ф.	195
НИКОНОРОВ А.Н.	224, 235

О

ОГУРЦОВ В.А.	326
ОКАТОВ И.М.	190
ОСИПОВ Д.А.	306

П

ПЕКУНОВ В.В.	331
ПЕРЕВЕЗЕНЦЕВ Г.А.	213
ПЕТРОВ В.С.	277
ПЛЕТНИКОВ С.Б.	68
ПОЛУЭКТОВА Е.А.	243, 246
ПОЛУЭКТОВА Н.А.	243
ПОПОВ С.К.	184
ПОТАПКИНА Е.Н.	75
ПРОНИН В.Ю.	207
ПРОРОКОВА М.В.	129, 133

Р

РАЗИНКОВ А.А.	26
РАЗОРЕНОВ Г.В.	44
РАКУТИНА Д.В.	197
РОДИОНОВ Г.А.	133, 140
РОСЛЯКОВ А.Н.	311

С

САЙФУТДИНОВ Р.И.	187
САМЫШИНА О.В.	204
СВИСТУНОВ И.Н.	184
СЕДЛОВ А.С.	75
СЕМЕНОВ В.К.	54
СЕННИКОВ В.В.	161, 167 190
СЕРГЕЕВ А.В.	288
СМИРНОВ А.А.	161, 167
СМИРНОВ Н.Н.	148
СОЗИНОВА Т.Е.	136
СОЛНЫШКОВА Ю.С.	140
СОРОКИНА А.Я.	78, 110
СТЕПИН И.А.	249
СУББОТИН В.И.	158
СУЛЕЙМАНОВ М.Г.	201
СУРИКОВ В.Н.	263

Т

ТАЛАНОВ В.Д.	68
ТВЕРСКАЯ М.М.	291
ТВЕРСКОЙ Д.Ю.	228
ТВЕРСКОЙ Ю.С.	224, 228 291, 295
ТЕПЛОВ Б.Д.	14
ТЕТЕРЕВКОВ И.В.	65
ТИБАЙКИН В.А.	140
ТИХОНОВ А.Е.	48
ТОМАШЕВСКАЯ М.С.	75
ТОТУХОВ Ю.А.	263

У

УЛАНОВ Д.А.	306
УХАЛОВА Е.Г.	78

Ф

ФАТАХЕТДИНОВ А.М.	326
-------------------	-----

Х

ХАЗОВ П.С.	41
ХАЛИУЛЛОВ Д.С.	285
ХАСХАЧИХ В.В.	220

Ч

ЧУХИН И.М.	7
------------	---

Ш

ШАТОВА И.А.	99. 102
ШУВАЛОВ С.И.	18
ШУИНА Е.А.	323

Щ

ЩЕГОЛЕВА Е.А.	114
ЩЕДЕРКИНА Т.Е.	256
ЩЕРБАКОВ М.С.	190
ЩЕРБАКОВА Г.Н.	140

BERTHIAUX H.	315
TANNOUS K.	319
URBANIAK D.	302
WYLECIAL T.	302

СОДЕРЖАНИЕ

Секция "ТЕПЛОВЫЕ И АТОМНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ"	3
Секция "ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА"	118
Секция "ТЕПЛООБМЕН В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСТАНОВКАХ"	195
Секция "СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ"	224
Секция "МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНИКЕ И ТЕХНОЛОГИЯХ"	299

МАТЕРИАЛЫ

Международной научно-технической конференции
**«СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ»**
(XVIII Бенардосовские чтения)

Печатаяются в авторской редакции

II том
Теплоэнергетика

Подписано в печать 27.04.2015. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 19,76. Уч.-изд. л. 20,80. Тираж 150 экз. Заказ .
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Типография ООО «ПресСто»

153025, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39