

На правах рукописи



МИЛУШ

Виктор Владимирович

**ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ
РЕШЕНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ВОДОПОДГОТОВКИ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

Специальность 05.14.01 — энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск - 2009

Работа выполнена на кафедре теоретической и общей теплотехники в ФГОУ ВПО "Дальневосточный государственный технический университет" (г. Владивосток).

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Слесаренко Вячеслав Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор
кандидат технических наук

Кулагин Владимир Алексеевич
Васильев Василий Васильевич

Ведущая организация:

ГОУ ВПО Томский политехнический университет (г. Томск)

Защита диссертации состоится «3» июня 2009 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ДМ 212.099.07 в ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет» по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ауд. Ж 1-15

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Политехнического института ФГОУ ВПО «Сибирский федеральный университет».

Автореферат кандидатской диссертации размещен на официальном сайте ФГУ ВПО «Сибирский федеральный университет» (<http://www.sfu-kras.ru/science/dissertation>).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения просим направлять по адресу: 660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26, ПИ СФУ, Ученому секретарю диссертационного совета ДМ 212.099.07.

Факс: (391)-243-06-92 (для кафедры ТЭС)

Е-mail: boiko@krgtu.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2009 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Е.А. Бойко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Решение проблем энергоресурсосбережения в энергетических системах и комплексах во многом связано с применением современных методов водоподготовки, которые являются составной частью технологии энергетического производства. Совершенствование методов и средств водоподготовки, технологических схем и аппаратов для очистки воды и стоков на предприятиях теплоэнергетики необходимо рассматривать как составную часть внедрения энергосберегающих технологий.

Поэтому важной задачей является разработка и исследование энергоэффективных схем аппаратов для подготовки воды на тепловых электростанциях и котельных. Применение методов энергосбережения, основанных на снижении энергетических потерь, присущих действующим теплоэнергетическим установкам, позволяет целенаправленно использовать утилизируемую тепловую энергию для термического обессоливания воды, деаэрации и других методов водоподготовки, применяемых в энергетических системах и комплексах.

Цель работы – разработка методов и средств повышения энергоэффективности систем водоподготовки энергетических комплексов.

Для достижения поставленной цели были рассмотрены и решены следующие задачи:

1. Определение рациональных областей использования энергосберегающих технологий с учетом особенностей работы аппаратов водоподготовки на энергетических предприятиях.
2. Исследование методов утилизации теплоты уходящих котловых газов и продувочной воды котлов для снижения энергетических затрат в процессах водоподготовки.
3. Разработка методики расчета термодинамических характеристик схем утилизации теплоты и определение параметров технологических процессов, необходимых для проектирования и практического внедрения современных аппаратов термического обессоливания.
4. Определение энерготехнологических характеристик теплообменных аппаратов и испарителей мгновенного вскипания, предлагаемых к использованию в схемах утилизации теплоты на теплоэнергетических установках (ТЭУ).

5. Проверка в эксплуатационных условиях предлагаемых технических решений по модернизации котлов и автоматизации технологических процессов с целью повышения технико-экономических показателей производства тепловой и электрической энергии за счет снижения тепловых потерь.

6. Обоснование использования энергосберегающих технологий на базе испарителей мгновенного вскипания в схемах утилизации теплоты уходящих газов и продувочной воды котлов.

Научная новизна работы.

1. Определены условия наиболее эффективного применения энергосберегающих технологий с целью усовершенствования систем водоподготовки.

2. Предложены новые методы оценки энергетического потенциала теплоносителя в системах утилизации теплоты, подключенных к установкам термической дистилляции, регенеративного подогрева теплоносителя, деаэрации воды и теплофикации.

3. Разработана математическая модель испарителя мгновенного вскипания для расчета технологических характеристик аппаратов термического обессоливания при их включении в схемы утилизации теплоты на энергетических комплексах.

4. Разработана методика оценки термо-технологической эффективности методов энергосбережения, основанных на использовании утилизируемого тепла в схемах водоподготовки на объектах теплоэнергетики.

Достоверность результатов исследований обеспечивается использованием современных методов моделирования и расчета процессов, позволяющих эффективно использовать температурный потенциал теплоносителя в схемах утилизации теплоты на барабанных котлах и испарительных установках. Результаты подтверждены сопоставлением расчетных характеристик исследуемых технологий с экспериментальными и эксплуатационными данными, полученными на действующем оборудовании электростанций.

Практическая значимость работы.

1. Подготовлены современные проектные и конструкторские решения, обеспечивающие внедрение энергосберегающих систем и испарительных установок мгновенного вскипания на энергетических предприятиях.

2. Обосновано промышленное применение испарителей мгновенного вскипания, как основного узла схемы утилизации теплоты уходящих котловых газов и продувочной воды барабанных котлов на ТЭС и котельных.

3. Усовершенствованы и рекомендованы к внедрению на Приморской ГРЭС новые схемы впрыска и подачи пара на собственные нужды электростанции, обеспечивающие дополнительную утилизацию теплоты продуктов сгорания по тракту котла с целью ее дальнейшего использования в системах водоподготовки и на технологические нужды энергетического предприятия.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на международной конференции «Современное состояние и перспективы развития энергетики» (Ташкент, 2006 г.), IV семинаре вузов Сибири и Дальнего Востока. «Теплофизика и теплоэнергетика» (Владивосток, 2005 г.), V семинаре вузов Сибири и Дальнего Востока «Теплофизика и теплоэнергетика» (Иркутск, 2006 г.), международной конференции «Инновационные энергосберегающие технологии в странах АТЭС» (Владивосток, 2007 г.), региональной научно-практической конференции энергетиков «Проблемы реформирования и особенности развития электроэнергетики Дальнего Востока (Владивосток, 2006 г.).

Личное участие автора в получении результатов заключается в обосновании, разработке и исследовании систем утилизации теплоты, оценке эффективности работы испарительных установок и теплообменного оборудования, анализе полученных результатов. Автором разработан ряд технических решений, направленных на использование утилизируемой в котлах тепловой энергии в аппаратах водоподготовки. При участии автора экспериментально проверена и подтверждена эффективность применения испарителей мгновенного вскипания на Райчихинской ГРЭС и Приморской ГРЭС. _

Публикации по работе. Результаты исследований представлены в 9 научных публикациях, включая 4 статьи, изданные в рекомендованных ВАК журналах.

Структура и объем диссертации.

Работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 102 наименований и приложений. Основной материал изложен на 149 страницах машинописного текста, работа включает 15 таблиц и 61 иллюстрацию.

На защиту выносятся следующие результаты выполненной работы:

1. Рекомендации по применению на энергетических комплексах систем утилизации теплоты уходящих газов и теплоты продувочной воды котельных агрегатов для энергосбережения на установках водоподготовки, оснащенных испарителями мгновенного вскипания, вакуумными деаэраторами и мембранными аппаратами.

2. Технологию использования в испарительных аппаратах и на покрытие собственных нужд станции утилизированной теплоты (на примере котлов Еп-670-140 Приморской ГРЭС), подтвержденную результатами промышленных испытаний котельных агрегатов.

3. Результаты исследования испарительных установок и моделирования процесса термического обессоливания, подтверждающие эффективность применения испарителей мгновенного вскипания на энергетических предприятиях при использовании теплоносителя с низкой температурой подогрева из систем утилизации теплоты котельных агрегатов.

4. Энергосберегающие технические решения, апробированные на энергоблоках Приморской ГРЭС и Райчихинской ГРЭС, позволяющие повысить технико-экономические показатели парогенераторов и вспомогательного оборудования.

5. Результаты технико-экономической оценки предложенных решений по применению в составе энергетических комплексов комбинированных водоподготовительных установок, включающих испарители и системы утилизации теплоты.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, научная новизна, практическая значимость работы, сформулированы цели и задачи исследования, дана характеристика структуры диссертации.

В первой главе приведен аналитический обзор публикаций по рассматриваемой проблеме и произведена оценка существующих методов водоподготовки в системах производства тепловой и электрической энергии с точки зрения их технико-энергетической эффективности и возможности утилизации теплоты.

Результаты анализа систем водоподготовки, действующих на ТЭУ, позволили сделать вывод о необходимости более широкого применения на ТЭС и котельных термических методов обессоливания воды. Рассмотрены возможности комбинирования различных методов обработки воды и снижения эксплуатационных затрат на водоподготовку за счет применения энергосберегающих технологий.

Установлено, что наиболее эффективными аппаратами с позиции энергосбережения являются испарители мгновенного вскипания, использующие на дистилляцию пар с давлением до 0,25 МПа или перегретую воду с температурой до 120 °С.

В исследовании произведена оценка работы водоподготовительной установки Райчихинской ГРЭС, где установлены два испарителя мгновенного вскипания ИМВ-20/16, которые за три года эксплуатации показали высокую энергетическую и экономическую эффективность.

Для снижения энергетических потерь, усовершенствования технологии водоподготовки, улучшения качества воды и пара, а также возможности резервирования оборудования разработаны и исследованы комбинированные схемы водоподготовительных установок (ВПУ) с обратноосмотическими мембранными аппаратами, дополняющими испарители и обеспечивающими снижение содержания солей в осветленной воде до нормативного уровня. Согласно расчетам применение такой схемы снижает сброс продувочной воды из испарителей на 75 – 80 % и уменьшает энергетические потери на ВПУ в 1,5 – 2 раза.

Исследованиями подтверждено, что снижение солесодержания в питательной воде перед испарителями при применении мембранных аппаратов позволяет понизить стоимость термических обессоливающих установок за счет упрощения их конструкции, уменьшения количества ступеней испарения, повышения удельных термодинамических показателей и производительности.

Используемые на энергетических комплексах дистилляционные системы имеют высокие технологические показатели, однако они достигнуты в основном за счет существенного усложнения конструкции аппаратов.

В работе рассмотрены основные технические решения, обеспечивающие эффективную работу испарителей в тепловой схеме энергетической установки с оценкой изменения эксергетического КПД испарителя типа ИМВ для каждого варианта.

Расчеты выполнены по зависимости

$$\eta_e = e_1/e_2, \quad (1)$$

где эксергия полезно затраченной в испарителе теплоты

$$e_1 = \sum Q_{1i} + T_0 C_p \sum G_{1i} \ln(T''_{1i} / T'_{1i}); \quad (2)$$

эксергия подводимой теплоты

$$e_2 = \sum Q_{2i} + T_0 C_p \sum G_{2i} \ln(T''_{2i} / T'_{2i}). \quad (3)$$

На основе выполненного анализа предложены рациональные и достаточно просто реализуемые системы утилизации теплоты на энергетическом предприятии с потенциалом, достаточным для обеспечения работы испарительных установок.

Вторая глава посвящена исследованию систем утилизации теплоты уходящих газов и продувки котлов, обеспечивающих тепловой энергией установки термического обессоливания и собственные нужды тепловых электростанций и котельных.

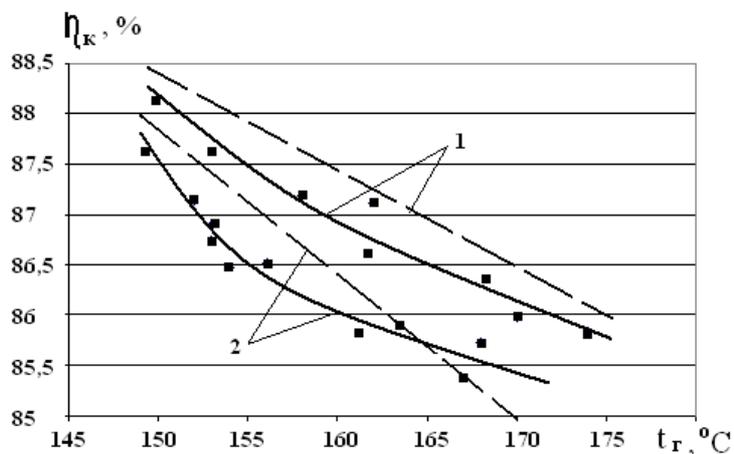


Рис. 1. Зависимость КПД котла Еп-670-140Ф от температуры уходящих газов:

- 1 – на номинальной нагрузке;
- 2 – на нагрузке 70% номинальной;
- по данным испытаний;
- - - - по данным расчета котла

Энергетический потенциал уходящих газов Приморской ГРЭС при работе котлоагрегатов на номинальной нагрузке составляет 42 Гкал/час на каждые 10 °С понижения температуры газов. Расчетами и опытами установлено (рис. 1), что понижение теплоты уходящих газов позволяет повысить КПД парогенераторов на 1,5 – 2,5 % при номинальной нагрузке и на 3 – 5 % при работе на 70 % мощности.

Установка дополнительной низкотемпературной экономайзерной ступени низкого давления ($P_3 < 2,0$ МПа) за воздухоподогревателем дает возможность получить на одном котле Еп-670-140 до 20 Гкал/час теплоты в виде горячей воды с температурным потенциалом 120 - 145 °С при расходе до 400 т/час.

Рассмотрены различные схемные решения для утилизации получаемого теплового потенциала, при этом основное внимание в исследованиях уделено использованию теплоты в испарителях мгновенного вскипания для получения дистиллята. Затраты теплоты в ИМВ-20/16 составляют 0,075 – 0,09 Гкал/тону дистиллята и параметры нагретой в дополнительном экономайзере воды обеспечивают энергозатраты ИМВ, что дает возможность применить на энергетических комплексах термическую систему водоподготовки и отказаться от традиционной схемы химического обессоливания воды.

Данные энергетического баланса уходящих дымовых газов для котлов типа Еп-670-140Ф приведены в табл. 1. Установлено, что потери тепла с уходящими газами могут быть уменьшены на участке до золоуловителей на 32 - 34 %, а при использовании всего теплового потенциала уходящих газов - на 60 - 65%.

Годовая экономия теплоты за счет снижения температуры уходящих газов только по Приморской ГРЭС может достигать 550 тыс. Гкал, при этом экономия условного топлива составит более 90 тыс. тут в год.

В работе выполнено сравнение теплового и эксергетического потенциала продувочной воды в рассмотренных схемах утилизации теплоты (табл. 2).

Таблица 1. Структура энергетического баланса уходящих дымовых газов

№	Составляющая энергобаланса	Расчетная зависимость	Котел Еп-670-140Ф	
			Гкал/ч	%
1	Располагаемая теплота уходящих газов	$Q_r = \Delta J_r \cdot V_{pr}$	57,88	100%
2	Технологический тепловой поток на коагуляцию	$Q_{zy} = J_{r75} \cdot V_{pr}$	12,25	21,2%
3	Работоспособная теплота для утилизации	$Q_{pr} = (J_{r165} - J_{r110}) \cdot V_{pr}$	19,55	33,8%
4	Потенциально работоспособный тепловой поток обезвоженных дымовых газов	$Q_{pr} = \Delta J_{r75} \cdot V_{pr}$	17,39	30%
5	Технологическая (эксергетическая) потеря теплоты	$Q_{e25} = J_{r25} \cdot V_{pr}$	8,69	15,0%

Таблица 2. Термодинамические показатели схемы продувки

Параметр	Продувочная вода	I ступень продувки	II ступень продувки
Расход, т/час (пар/вода)	0/4,0	1,664/2,336	0,027/2,309
Давление, МПа	14	0,8	0,15
Температура, °С	335	170	110
Эксергетический потенциал (пар/вода), ГДж/час	0/6,343	4,605/1,686	0,072/1,613
Тепловой потенциал (пар/вода), ГДж/час	0/6,288	4,604/1,684	0,072/1,612
Утилизируемая теплота, %	-	73,2	4,3
Эксергетические потери, %	0,86	0,97	0,971
Полные потери, %	99,14	25,23	20,971

Эксергетические показатели схемы продувки рассчитаны по выражению

$$E_e = Q_{pr} - T_0 \Delta S_{pr} + P_{pr} V_{pr} . \quad (4)$$

Тепловой потенциал определен без учета потерь располагаемой работы и эксергии продувочной воды $E_{пт} = Q_{пр}$.

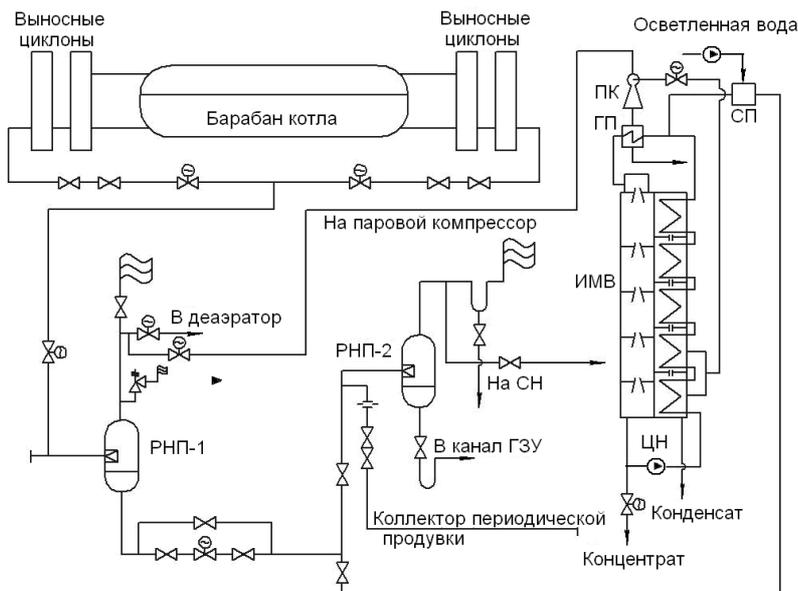


Рис.2. Схема продувки на котле Еп-670-140Ф с подключенным испарителем: РНП – расширитель непрерывной продувки; ИМВ – испаритель (на схеме показан один корпус); ЦН – циркуляционный насос; ПК – паровой компрессор; ГП – головной подогреватель; СП- смесительный подогреватель; СН – собственные нужды

Предложена и исследована схема подключения ИМВ к системе продувки котла Еп-670-140 (рис. 2). Данные термодинамического анализа действующей схемы продувки показывают, что в схеме теряется около 37,5 % теплоты (2,54 ГДж/час).

Разработаны рекомендации по использованию энергетического потенциала продувочной воды котлов в схеме испарителя мгновенного вскипания.

В третьей главе представлены результаты технологических и оптимизационных расчетов показателей ИМВ на основе разработанной математической модели, которые учитывают структуру тепловой схемы испарителей, характеристики процессов тепломассообмена, возможность подключения испарителей к схемам утилизации теплоты на теплоэнергетических комплексах. В качестве базовых вариантов при определении параметров ИМВ приняты три вида аппаратов: многоступенчатая установка прямоточного типа, установка с общей рециркуляцией рассола (рис. 3) и многоступенчатая установка с охлаждением на трех ступенях и регенерацией (рис. 4).

Испарительные установки мгновенного вскипания имеют многоступенчатую структуру, при оптимизации которой температурные перепады на ступенях $\Delta T_{ст}$ устанавливаются обычно одинаковыми, при таком допущении производительность установки определяется известным выражением

$$G_A = G_{ц} \left[1 - \left(1 - \frac{c_B \Delta T_{ст}}{r_{вп}} \right)^n \right], \quad (5)$$

где $G_{ц}$ – расход через систему циркуляции; n – количество ступеней испарения.

Разработанная и исследованная в работе модель ИМВ позволяет рассчитывать удельные показатели ИМВ при варьировании основных режимных параметров аппарата и изменении его технологической схемы.

На компьютерной модели рассчитано влияние на режим работы испарителя изменения параметров теплоносителя (греющего пара, вторичного пара, питающей и охлаждающей воды), расходных характеристик, а также изменения температурного напора в зависимости от наличия накипи на поверхности теплообмена головного подогревателя и конденсаторов ИМВ.

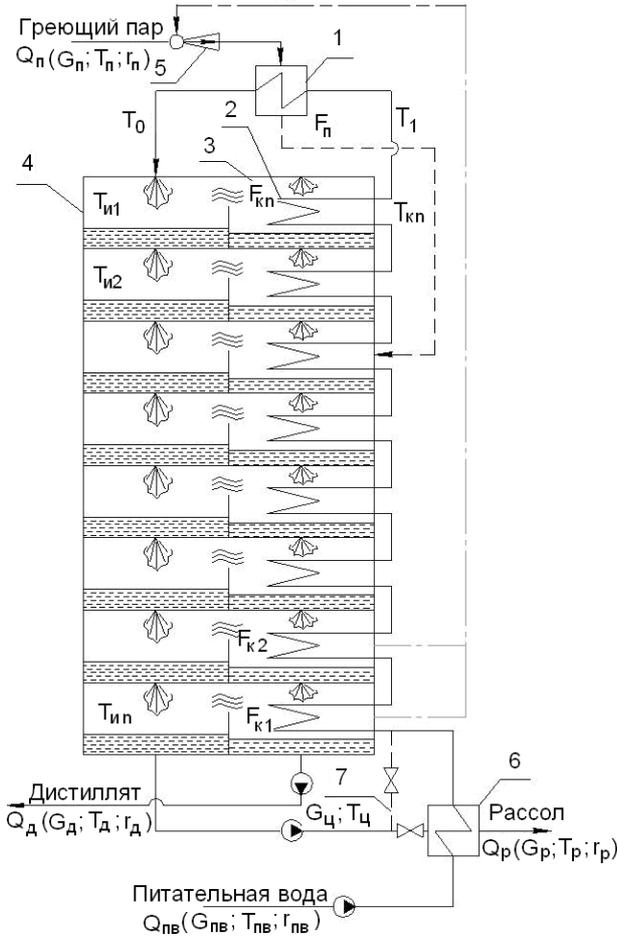


Рис. 3. Расчетная схема прямоточной установки мгновенного вскипания и установки с рециркуляцией: 1 – головной подогреватель; 2 – конденсатор; 3 – сборник дистиллята; 4 – ступень испарения; 5 – паровой компрессор; 6 – теплообменник; 7 - линия рециркуляции

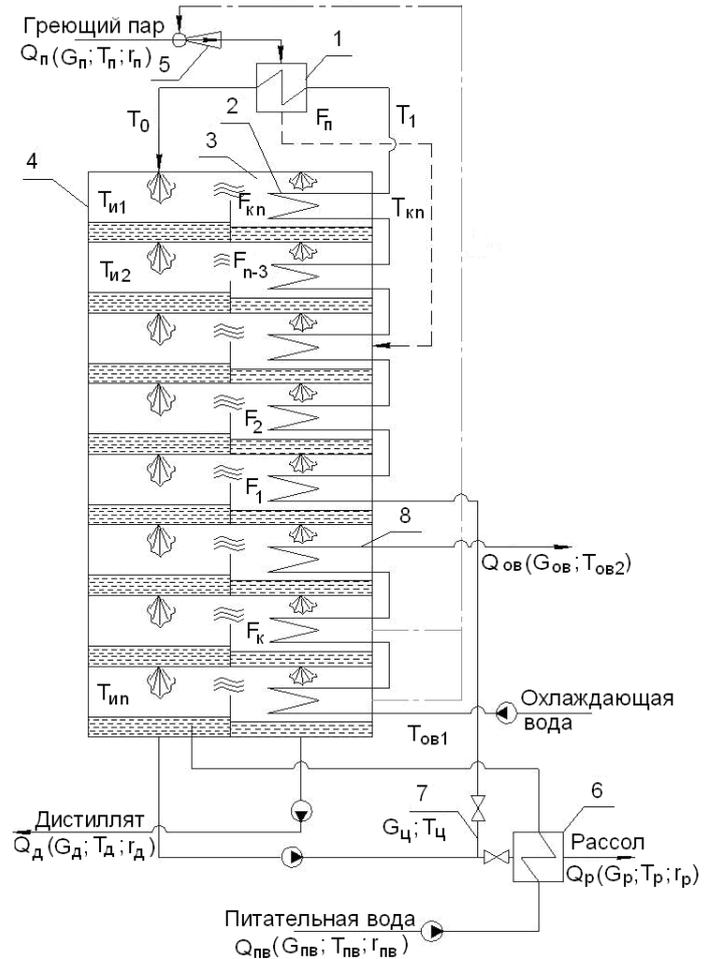


Рис. 4. Расчетная схема установки мгновенного вскипания с тремя ступенями охлаждения: 8 – конденсатор ступени охлаждения

Уравнение для определения коэффициента выработки $d_{и}$ для одной ступени установки имеет вид

$$d_{и} = \frac{r'' \Delta T_{ст}}{r' (\Delta T_{ст} + \Delta T_{к} + \Delta T_{пот})} \quad (6)$$

Расчеты схемы ИМВ показали, что аппараты прямоточного типа позволяют достигать коэффициента выработки $d_{и} = 5 - 6$, что существенно выше, чем у действующих испарителей кипящего типа.

Снижение расхода исходной воды, поступающей в ИМВ, достигается в схемах с рециркуляцией (рис.3). По уравнениям материального и теплового баланса получаем, что для такой схемы величина относительной выработки составит:

$$d_{и} = \frac{r_{вп}}{(C_p - C_{пв})} (T_{п} - T_{пв}) \cdot \quad (7)$$

Удельная поверхность нагрева головного подогревателя при известных значениях $d_{и}$, $r_{вп}$ и $\Delta T_{п}$ рассчитывается $f_{п} = \frac{r_{вп}}{k_{п} \Delta T_{п} d}$.

Основное преимущество, достигаемое в ИМВ с рециркуляцией – повышение температуры циркулирующего рассола на последней ступени способствует снижению количества теплоты на испарение рассола и возрастанию от-

носительной величины $g_{п} = \frac{G_{п}}{G_A}$ из-за уменьшения разницы температур $T_0 - T_{п}$.

Главная цель включения в тепловую схему установки секции охлаждения с рециркуляцией – это устранение избыточных расходов теплоты в головном подогревателе. Наличие секции охлаждения обеспечивает снижение расходов на предварительную подготовку большого количества исходной воды.

Анализ процессов в установке мгновенного вскипания с трехступенчатой секцией (рис. 4) основан на уравнениях, описывающих работу регенеративной и рециркуляционной частей. При оценке тепловой эффективности ИМВ использованы уравнения для одноступенчатой модели и зависимости для установки со смешением потоков питательной воды и рассола.

Коэффициент относительной выработки для этой схемы находится

$$d_{и} = \frac{r_{вп} \eta_{п}}{g_{п} c_p n \Delta T_{ст}} \cdot \quad (8)$$

Как видно из графиков (рис. 5) наибольшая эффективность достигается в установке, работающей по схеме с рециркуляцией и регенерацией в трех дополнительных секциях. Относительная поверхность конденсаторов f_k наименьшую величину имеет в установке с тремя ступенями рециркуляции. Повышение начальной температуры нагрева воды T_0 пред испарителем снижает требуемую поверхность теплообмена у конденсаторов ступеней ИМВ. Коэффициент отно-

сительной выработки $d_{и}$ с повышением начальной температуры воды увеличивается (рис.6).

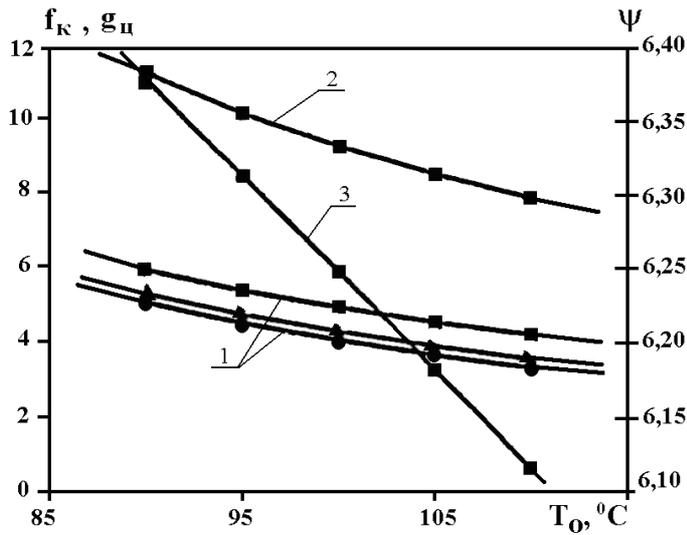


Рис. 5. Показатели установки с рециркуляцией рассола: 1 – f_k ; (● – прямоточная схема; ▲ - схема с рециркуляцией; ■ – схема с рециркуляцией и охлаждением); 2 – $g_{ц}$; 3 – $\psi = C_p/C_{пв}$; ($n = 16$)

нию с одноступенчатыми примерно в 5 - 6 раз, но для такого типа ИМВ существует проблема подачи большого количества исходной воды на обессоливание, которая решается включением секции рециркуляции в схему установки.

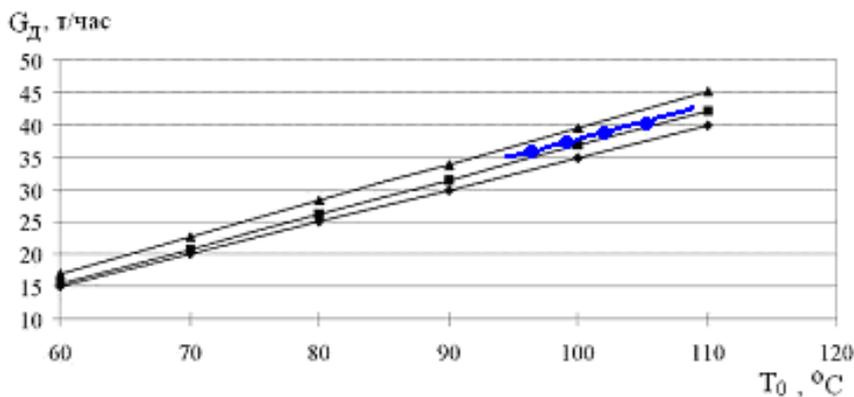
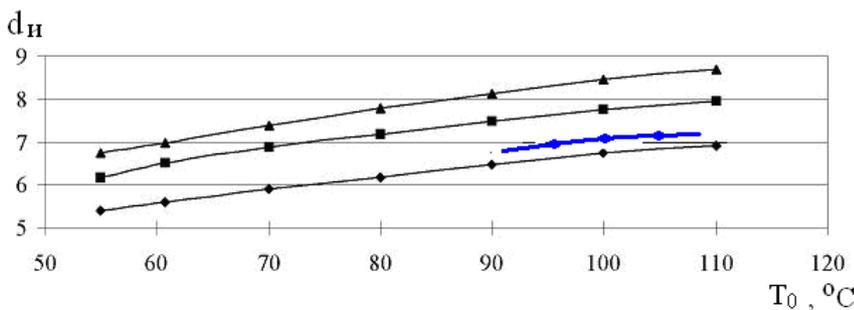


Рис. 6. Показатели ИМВ при изменении температуры нагрева исходной воды и кратности циркуляции:
▲ - $g_{ц} = 6$; ■ - $g_{ц} = 7$; ◆ - $g_{ц} = 8$;
- - - ● - по данным испытаний ИМВ на Райчихинской ГРЭС

Из уравнений (3 – 5) следует, что коэффициент выработки $d_{и}$ также зависит от числа ступеней, величин недогрева ΔT_n , ΔT_k и от располагаемого температурного напора

$$\Delta T_{ст} = \frac{T_o - T_{пв}}{1 + \frac{g_{ц} \eta_k m}{n}} \quad (9)$$

Анализ работы испарителей на основе модельных расчетов позволяет сделать следующие выводы: прямоточные установки обеспечивают повышение относительной выработки по сравнению с одноступенчатыми примерно в 5 - 6 раз, но для такого типа ИМВ существует проблема подачи большого количества исходной воды на обессоливание, которая решается включением секции рециркуляции в схему установки.

Для схемы ИМВ, содержащей узел смешения, величина коэффициента выработки $d_{и}$ возрастает до 7 - 8, однако это решение приводит к существенному увеличению расхода теплоносителя в контуре рециркуляции и повышению концентрации солей в ступенях обессоливания, что способствует образованию накипи в головном подогревателе.

В результате расчетов по разработанной модели ИМВ, установлено, что наблюдается линейный характер изменения производительности установки и коэффициента относительной выработки $d_{и}$ в зависимости от начальной температуры T_0 (рис. 6) при других одинаковых параметрах работы ИМВ.

С целью оценки основных параметров работы испарителей были проведены испытания аппаратов ИМВ-20/16, установленных на Райчихинской ГРЭС. Данные испытаний были использованы при проектировании и разработке термообессоливающего комплекса для Приморской ГРЭС, предназначенного для выработки дистиллята в ИМВ, подключаемых к системе утилизации теплоты уходящих газов котла или продувочной воды.

В четвертой главе представлены результаты исследований, направленных на реализацию технических решений, позволяющих использовать дополнительное количество теплоты, получаемое в котельных агрегатах.

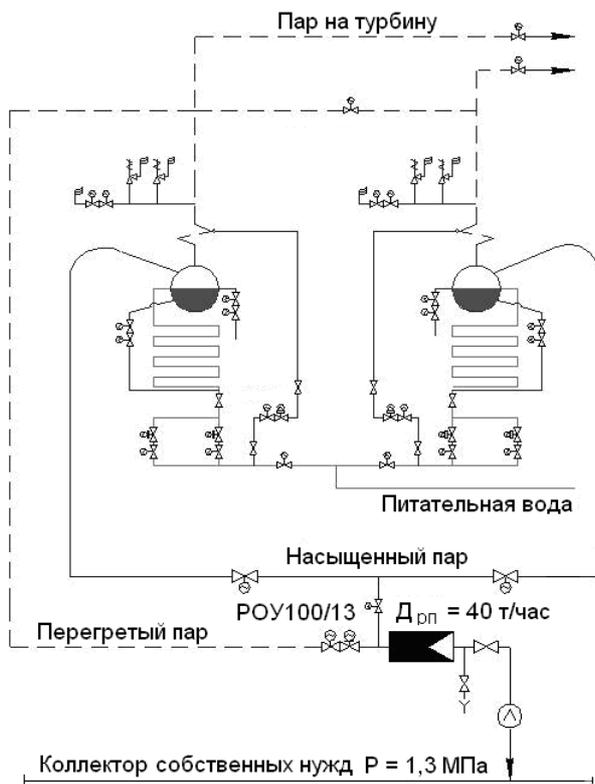


Рис.7. Схема подачи насыщенного пара из барабана котла в коллектор собственных нужд через редуционно-охладительную установку (РОУ)

термический КПД цикла несколько уменьшается, однако это компенсируется снижением коэффициента ценности используемой теплоты $\xi = \Delta Q_{пп} / \Delta Q_{пп}$. В рассмотренном случае $\xi = G_{пп} (h_{пп} - h_{пв}) / G_{пп} (h_{пп} - h_{пв})$ и имеет величину, значительно меньше единицы ($\xi = 0,697$).

Разработана и апробирована тепловая схема байпасирования части насыщенного пара из барабана котла помимо конвективного пароперегревателя и подачи этого пара в коллектор собственных нужд через РОУ (рис. 7). Данные теплового расчета модернизируемой РОУ приведены на рис 8. Рассматриваемая схема позволяет отключить от отборов турбины часть потребителей пара и подавать получаемый резервный пар из отборов на испарители мгновенного вскипания.

При использовании насыщенного пара на собственные нужды

Изменение режима работы пароперегревателя обеспечивает рост температуры острого пара за котлом (рис.9). Повышение температуры перегрева пара на 1 °С приводит к увеличению термического КПД цикла Ренкина на 0,2%, что эквивалентно снижению удельного расхода топлива на 0,77 гут/кВт·ч.

Повышение эксергетического КПД установки исходя из зависимости (1) определяется как $\Delta\eta_e = G_{\text{пп}}(h_{\text{пп}} - h_{\text{пп}})/\sum G_{\text{пг}}(h_{\text{пп}} - h_{\text{ки}})$, что дает $\Delta\eta_e = 15,2\%$.

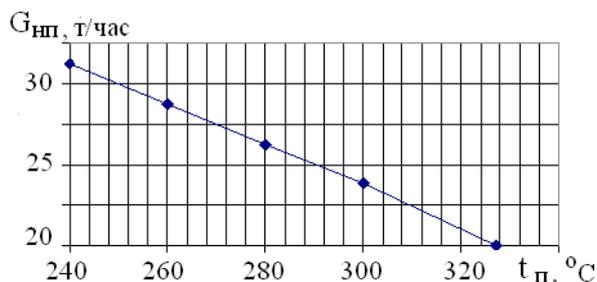


Рис. 8. Зависимость расхода насыщенного пара от температуры пара за РОУ

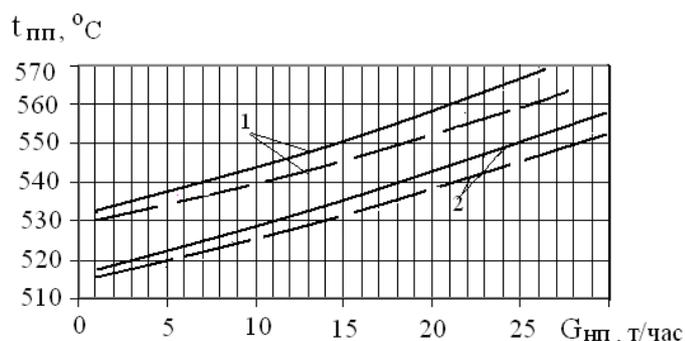


Рис.9. Изменение температуры перегрева при снижении расхода пара через пароперегреватель: 1- $t_{\text{пп}}^* = 530 ^\circ\text{C}$; 2 - $t_{\text{пп}}^* = 515 ^\circ\text{C}$ ($t_{\text{пп}}^*$ - исходные значения температуры перегрева пара на действующих котлах); — — — - эксперимент; — — — - расчет;

где $\Delta G_{\text{ЭК}}$ - дополнительный расход воды на впрыск. Реальное значение расхода $\Delta G_{\text{ЭК}}$ определяется по зависимости:

$$\Delta G_{\text{ЭК}} = (G_{\text{I}} + G_{\text{II}}) [(h_{\text{пп}} - h_{\text{пв}})/(h_{\text{пп}} - h_{\text{ЭК}}) - 1], \quad (11)$$

Тогда после подстановки получаем:

$$\Delta Q_{\text{ЭК}} = (G_{\text{I}} + G_{\text{II}}) (h_{\text{пп}} - h_{\text{пв}}) [(h_{\text{ЭК}} - h_{\text{пв}})/(h_{\text{пп}} - h_{\text{ЭК}})]. \quad (12)$$

Из анализа уравнений 10 - 12 следует, что расход питательной воды через экономайзер и тепловосприятие экономайзера котла увеличиваются с повышением расхода воды на впрыск и зависят от температурных характеристик питательной воды, подаваемой на впрыск (табл. 3). На номинальном режиме работы парогенератора при $(G_{\text{I}} + G_{\text{II}}) = 35$ т/час расход воды увеличивается на $\Delta G_{\text{ЭК}} = 12$ т/час, а дополнительное количество утилизируемой в

Для генерации дополнительного количества пара котельным агрегатом предложено использовать узел регулирования температуры пара. При этом вода, нагретая до температуры насыщения, забирается на впрыск непосредственно за основным экономайзером котла.

По уравнениям теплового баланса для узла впрыска и экономайзера рассчитано отбираемое от продуктов сгорания при работе котла по предложенной схеме дополнительное количество теплоты:

$$\Delta Q_{\text{ЭК}} = \Delta G_{\text{ЭК}} (h_{\text{п}} - h_{\text{пв}}), \quad (10)$$

экономайзере теплоты будет равно $\Delta Q_{\text{эк}} = 7,5 \text{ ГДж/час}$.

Увеличение расхода воды на впрыск позволяет при необходимости повышать паровую производительность котельного агрегата, а также снижать расход насыщенного пара из барабана в пароперегреватель. Перераспределение тепловосприятия в котле в пользу экономайзера позволяет при номинальной нагрузке котла снизить температуру газов за экономайзером на 4,5 – 4,7 °С, при этом КПД котла увеличивается на 0,25 - 0,3%. В результате экономического расчета установлено, что экономия топлива от реализации предлагаемого решения с учетом повышения качества регулирования температуры перегрева пара и эффективного использования систем автоматики котла превышает 2300 тонн условного топлива в год.

Таблица 3. Результаты расчета модернизированного узла впрыска

Расход воды на впрыск ($G_I + G_{II}$), т/час	Температура питательной воды / за экономайзером, °С			
	160/300	245/300	160/345	245/345
5	1,42/0,873	0,526/0,121	2,74/2,70	1,74/1,09
10	2,84/1,75	1,05/0,242	5,48/5,40	3,48/2,18
25	7,11/4,37	2,63/0,605	13,7/13,4	8,71/5,46
35	9,91/6,11	3,68/0,845	19,2/18,9	12,2/7,64
50	14,2/8,37	5,26/1,21	27,4/27,0	17,4/10,9
80	22,7/13,97	8,42/1,94	43,84/43,2	27,8/17,5
Увеличение расхода впрыска / Утилизация тепла в экономайзере (т/час)	ГДж/час			$\Delta G_{\text{эк}} / \Delta Q_{\text{эк}}$

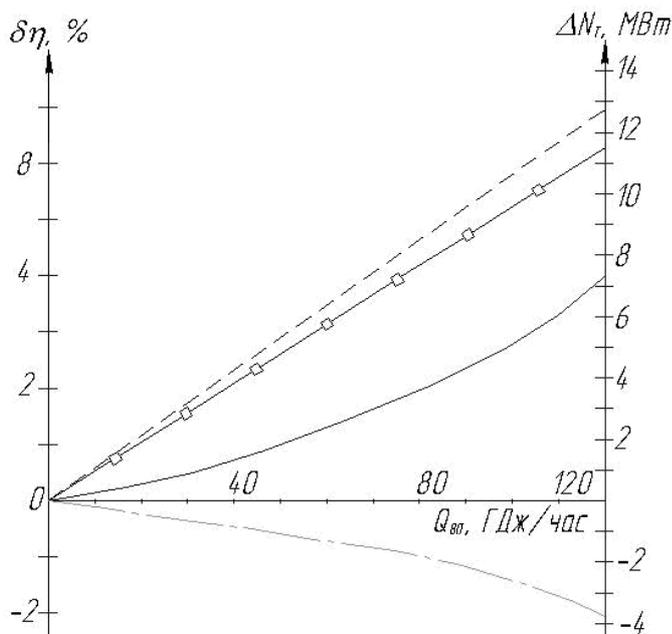


Рис. 10. Относительное изменение составляющих КПД энергоблока и мощности турбины при сокращении расхода пара из отборов:

— $\delta\eta_y$; — — — $\delta\eta_k$;
 - · - · - $\delta\eta_g$; —□—□— ΔN_T

Выполненные исследования показывают, что снижение термического КПД агрегатов не всегда является фактором, ограничивающим применение энергосберегающих технологий. Интегральный КПД энергоблока КЭС определяется по зависимости $\eta_y = \eta_t \eta_k \eta_r \eta_g$, включающей кроме термического КПД, коэффициенты полезного действия котла, турбины и генератора, и поэтому их влияние на изменение общего КПД может быть взаимно скомпенсировано.

На рис. 10 показано изменение составляющих КПД установки в случае замещения вторичным паром, полученным в схеме утилизации теплоты, пара из отборов турбины для энергоблока 210 МВт Приморской ГРЭС.

Увеличение КПД котельного агрегата во всем расчетном диапазоне компенсирует уменьшение термического КПД цикла. Кроме этого, сокращение расхода пара из отборов позволяет повысить вырабатываемую турбиной мощность без увеличения производительности котла по перегретому пару.

Результаты анализа позволили рекомендовать к внедрению на Приморской ГРЭС энергосберегающие варианты схемы обеспечения собственных нужд станции за счет утилизации теплоты в экономайзерных поверхностях нагрева котлов.

Пятая глава посвящена оценке технико-экономических показателей разработанных систем энергосбережения. На практических примерах выполнен сравнительный анализ различных методик, применяемых для определения технико-экономической и технологической эффективности технических решений,

При наличии резерва тепловой производительности у действующего экономайзера котла часть питательной воды может быть преобразована в пар в расширителе. Такое решение предложено использовать на электростанциях для обеспечения работы испарительных установок, деаэраторов, теплофикационных узлов и других потребителей пара низких параметров. Вторичный пар, замещая пар из отборов турбины, направляется внешним потребителям и на собственные нужды электростанции.

обеспечивающих внедрение энергосберегающих технологий на энергетических комплексах.

Таблица 4. Результаты расчета ТЭП системы утилизации теплоты

Характеристика	Расчетная формула	Значение
Среднегодовая паровая нагрузка (т/ч)	Эксплуатационные данные	490,8
Среднегодовая температура уходящих газов (°С)	Эксплуатационные данные	151
Приведенный тепловой поток на участке до ММК (Гкал/ч)	$Q_{\text{факт}}^{\text{тп}} = Q_{\text{ном}}^{\text{тп}} (t_{\text{yx}}^{\text{ф}} - t_{\text{yx}}^{\text{н}}) / (t_{\text{yx}}^{\text{н}} - t_{\text{yx}}^{\text{н}})$	14,57
Годовая экономия тепла на одном котельном агрегате (Гкал)	$\Delta Q = Q_{\text{факт}}^{\text{тп}} \cdot h_{\text{год}}$	72850
Годовая экономия условного топлива на один котел (тут)	$\Delta B = \Delta Q / (7000 \eta_{\text{бр}})$	12087
Снижение удельного расхода условного топлива (гудт/кВт.ч)	$\Delta b_{\text{ут}}^{\text{н}} = \Delta B \cdot n_{\text{к}} / \mathcal{E}_{\text{отп}}$	14,5
Годовой экономический эффект (тыс. руб.)	$\mathcal{E}_{\text{год}} = \text{Ц}_{\text{ут}} \cdot \Delta B \cdot n_{\text{к}}$	84000
$\eta_{\text{бр}}$ – среднегодовой отчетный КПД брутто котла (86,1% для Еп-670-140). $\text{Ц}_{\text{ут}}$ - ожидаемая тарифная стоимость тонны условного топлива в энергосистеме		

Реализовано комбинирование этих методик с оценкой относительных изменений приведенных затрат для определения технико-экономической эффективности исследуемых систем водоподготовки.

Для обоснования предлагаемой системы утилизации теплоты уходящих газов с ЭСНД по методу теплового баланса выполнен расчет технико-экономических показателей модернизируемого котла (табл. 4).

Так как зависимости для оценки энергетической эффективности ИМВ, получаемые при расчете тепловой схемы испарителя на основе материальных и энергетических балансов, не учитывают качественных особенностей процесса обессоливания, то эффективность работы ИМВ оценивалась величиной эксергетического КПД

$$\eta_e = \frac{e_o}{e_y} = 1 - \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\Delta e_i}{e_y}, \quad (13)$$

где e_o – полезно использованная эксергия; Δe_i – потери эксергии в элементах установки; e_y – полный расход эксергии на установке.

Определялись потери теплоты по элементам ИМВ, а затем по их значению рассчитывался эксергетический КПД всей установки (табл. 5).

Таблица 5. Результаты расчета эксергетических потерь в ИМВ-20/16

Вид эксергетической потери	Расчетное уравнение	Относительная величина потери, %
На нагрев исходной воды в экономайзере-утилизаторе	$\Delta e_k = C_p T_{oc} G_{MB} \left(\ln \frac{T_{BX}}{T_{ВЫХ}} - \frac{T_{ВЫХ} - T_{BX}}{T_{oc}} \right)$	5 - 6
В головном подогревателе	$\Delta e_{гп} = G_{гп} [(h'' - h') - T_{oc}(s'' - s')]]$	5 - 6
В камере вскипания ИМВ	$\Delta e_c = \frac{C_p T_{oc} G_{MB} \Delta T^2}{2T_{п} \left(\frac{1}{2} \Delta T + T_{п} \right)}$	10 - 12
В соединительных магистралях	$\Delta e'' = \frac{T_{oc} G_{гп} \Delta P (c_p - c_v)}{P}$;	1 - 2
В окружающую среду от камер испарения	$\Delta e_{oc} = \frac{kF(T' - T_{oc})^2}{T'}$	2 - 3
С рассолом и охлаждающей водой	$\Delta e_{об} = G_{об} [C_B(T_{об1} - T_{об2}) - T_{oc}(S_{об1} - S_{об2})]$	25 - 30
В насосах циркуляции и ИМВ	$\Delta e_n = (1 - \eta_M) N_H + \frac{T_{oc}}{T_H} (1 - \eta_i) \eta_M N_H$	45 - 50

Анализ термодинамической эффективности ИМВ позволил выделить элементы установки, для которых рассчитаны параметры процесса обессоливания, обеспечивающие снижение эксергетических потерь. В работе предложено применить для оценки эффективности термических ВПУ коэффициент технико-экономического совершенства термообессоливающего комплекса K_{ex} . Этот показатель включает кроме η_e интегральную стоимость подводимой к системе эксергии $\sum e_i$ и эксплуатационные затраты на производство дистиллята Z_A .

$$K_{ex} = \eta_e \sum_{i=1}^e \frac{\Pi_{ei} e_i}{Z_A}. \quad (14)$$

На рис 11. приведены графики, показывающие изменение интегрального термо-экономического показателя K_{ex} для различных схемных решений подключения ИМВ к системе утилизации теплоты.

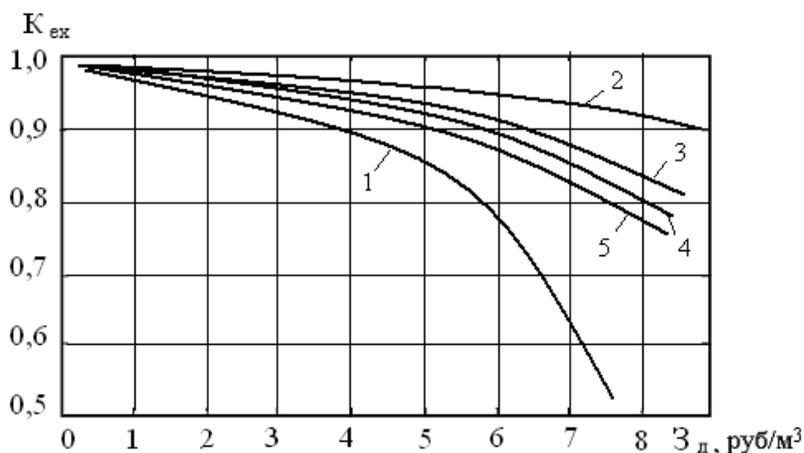


Рис. 11. Связь критерия K_{ex} с себестоимостью дистиллята, получаемого в ИМВ: 1 – без утилизации теплоты; 2 – с утилизацией теплоты в ИМВ без головного подогревателя; 3 – с утилизацией теплоты в ИМВ с водо-водяным подогревателем; 4 – с утилизацией теплоты в ИМВ с головным подогревателем; 5 – с утилизацией теплоты продувочной воды котла

Выполненное термо-экономическое моделирование ИМВ позволило произвести структурные изменения тепловых схем испарителя и найти наименее затратные способы повышения показателей испарительных аппаратов.

При максимальном $K_{эx} = 1$ и идеальной термодинамической системе (при $\eta_e = 1$) суммарный баланс всех рабочих эксергетических потоков в ИМВ любого типа связан с технологическими издержками

$$\Sigma (C_{ei}e_i) = Z_{\Delta}, \quad (15)$$

где C_{ei} – стоимость каждого эксергетического потока, используемого в системе.

Из уравнения (15) следует, что снижение затрат Z_{Δ} достигается сокращением эксергетических потерь и уменьшением себестоимости энергетических составляющих процесса дистилляции.

На рис. 12 представлены сравнительные расчеты экономической эффективности ИМВ по обычной методике и с учетом эксергетических показателей. Как следует из рассматриваемых графиков при обычной методике, когда себестоимость определяется по эксплуатационным и капитальным затратам без учета необратимости тепловых и механических процессов в ИМВ, ее значение существенно занижено.

Приведенные результаты экономических расчетов подтверждают целесообразность применения рассмотренных в работе систем утилизации теплоты, обеспечивающих тепловой энергией испарительные установки мгновенного

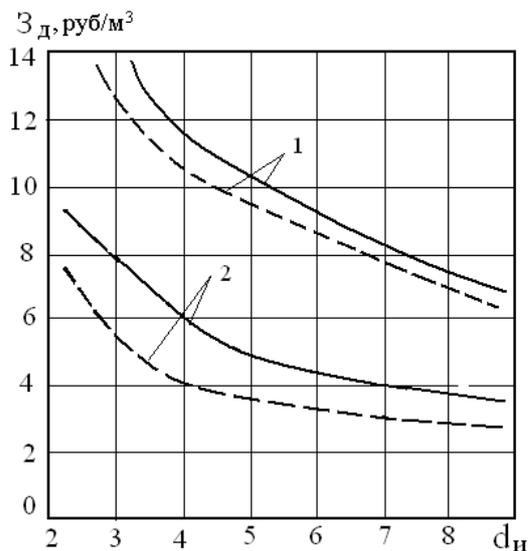


Рис.12. Оценка экономической эффективности испарителей по различным методикам: ----- – по типовой; $\square\square\square\square$ – с учетом эксергетических потерь; 1 – для ИМВ без утилизации теплоты; 2 – для ИМВ с утилизацией теплоты

вскипания, теплофикационный узел Приморской ГРЭС и других потребителей теплоты на собственные нужды.

В соответствии с результатами выполненного экономического анализа стоимость подготовки дистиллята по предлагаемой технологии термообессоливания составляет около 10 руб./тонну, тогда как обработка воды в системе водоподготовки станции обходилась в 2007-2008 г.г. в 40 руб./тонну.

Основные выводы и результаты работы:

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований обосновано применение испарителей мгновенного вскипания в качестве базового узла водоподготовительной установки для обессоливания воды в энергетических системах и комплексах.
2. Разработаны технические решения по применению на энергетических комплексах систем утилизации теплоты уходящих газов и теплоты продувочной воды котельных агрегатов для энергосбережения на установках подготовки воды, оснащенных испарителями мгновенного вскипания.
3. Выполнены исследования систем утилизации теплоты уходящих газов на котлах Еп-670-140 Приморской ГРЭС, проведены промышленные тепловые испытания котельных агрегатов для оценки теплового потенциала уходящих газов, подтверждена возможность использования утилизированной теплоты в испарителях мгновенного вскипания и на покрытие собственных нужд станции.
4. Расчетами и экспериментами установлено, что при применении системы утилизации теплоты уходящих газов или теплоты продувочной воды величина повышения КПД котла Еп-670-140 достигает 2,5 % на номинальной нагрузке и 5 % на пониженной нагрузке (70% мощности).
5. В результате исследования схем испарительных установок и моделирования процесса дистилляции как многофакторной задачи подтверждена эффективность применения испарителей мгновенного вскипания на теплоэнергетических установках при использовании теплоносителя из систем утилизации теплоты котельных агрегатов.
6. Разработаны рекомендации по модернизации систем водоподготовки с целью создания на энергетических комплексах комбинированной обессоливающей установки на базе современных испарителей и мембранных аппаратов.
7. Предложены, исследованы и апробированы на агрегатах Приморской ГРЭС энергосберегающие технические решения, позволяющие оптимизировать работу котлов и их вспомогательного оборудования.
8. На основе технико-экономического анализа подтверждены технологические преимущества применения на энергетических комплексах комбинированных водоподготовительных установок, включающих испарители мгновенного вскипания, подключенные к системам утилизации теплоты.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

1. Милуш В.В. Применение испарительных установок в схеме утилизации тепла уходящих газов на Приморской ГРЭС [Текст] / В.В.Милуш, В.В. Слесаренко // Энергосбережение и водоподготовка. - 2008. -№2 . – С.10 - 12 .
2. Милуш В.В. Утилизация теплоты уходящих газов в схемах деаэрации на промышленно-отопительных котельных [Текст] / В.В.Милуш, В.В. Слесаренко, А.А. Белоусов [Текст] // Промышленная теплоэнергетика. - 2008.-№ 9.– С. 8-11.
3. Милуш В.В. Оптимизация схемы продувки котлов на Приморской ГРЭС [Текст] / В.В.Милуш, В.В. Слесаренко, А.А. Тымчук // Энергосбережение и водоподготовка. - 2008. -№ 6 . – С.16-20.
4. Милуш В.В. Усовершенствование системы регулирования температуры перегрева пара на энергоблоках 210 МВт Приморской ГРЭС ГРЭС [Текст] / В.В.Милуш, В.В. Слесаренко, А.А. Белоусов // Теплоэнергетика. - 2008. - №6. - С. 71-73.
5. Милуш В.В. Особенности регулирования температуры перегрева пара на котлах БКЗ-670-140 Приморской ГРЭС [Текст] /В.В.Милуш, В.В. Слесаренко // Современное состояние и перспективы развития энергетики: материалы международной науч.-техн. конф. – Ташкент: Изд-во ТашГТУ. – 2006.- С. 86-88.
6. Милуш В.В. Моделирование процессов теплообмена при регулировании температуры перегрева пара в котлах БКЗ-670-140 Приморской ГРЭС [Текст] /В.В.Милуш, В.В. Слесаренко // Теплофизика и теплоэнергетика: материалы V семинара вузов Сибири и Дальнего Востока. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ. – 2006.- С.56-57 .
7. Милуш В.В. Исследование работы системы регулирования температуры перегрева пара в структуре АСУ ТП [Текст] / В.В.Милуш, В.В. Слесаренко, Л.Е. Андреев // Теплофизика и теплоэнергетика: материалы IV семинара вузов Сибири и Дальнего Востока. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ. – 2005.- С. 48-49.
8. Милуш В.В. О задачах технической диагностики энергоблока [Текст] /В.В.Милуш // Перспективные материалы, технологии, конструкции. – Сб. науч. трудов: Красноярск: СО РАН, 2001. - С.22-26
9. Милуш В.В. Синтез непараметрических систем управления динамическими объектами [Текст] / В.В.Милуш // Проблемы синтеза и проектирования систем автоматического управления. Материалы науч. – практ. семинара. – Красноярск: Изд-во КГТУ, 2001. - С.14-16 .

Для заметок

Милуш Виктор Владимирович

Энергосберегающие технологии и технические решения для систем
водоподготовки энергетических комплексов

Автореферат

Факс 8-4232-260727. E-mail: mvv@lutek.ru

Подписано в печать 2009 г. с оригинал-макета
Усл. печ. л. Формат 60x84 1/16. Тираж 100 экз. Заказ № .

Типография издательства ДВГТУ, Владивосток, ул. Пушкинская д. 10.