

---

*На правах рукописи*

**МАЛИНИНА ОЛЬГА ВЛАДИМИРОВНА**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСХОДА ВЫПАРА  
И СПОСОБОВ ЕГО УТИЛИЗАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕАЭРАЦИИ ВОДЫ**

Специальность 05.14.14

«Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

Иваново 2004

Работа выполнена в научно – исследовательской лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки» Ульяновского государственного технического университета

**Научный руководитель:**

доктор технических наук, профессор

Шарапов Владимир Иванович

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор  
кандидат технических наук, доцент

Елин Николай Николаевич  
Виноградов Владимир Николаевич

**Ведущая организация:** Всероссийский Теплотехнический  
научно-исследовательский институт

Защита состоится « 10 » декабря 2004 г. в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корпус Б, ауд. № 237.

Отзывы (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим направлять по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, Ученый Совет ИГЭУ. Тел. (0932) 38-57-12, факс (0932) 38-57-01

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИГЭУ.

Автореферат разослан: « 2 » ноября 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212. 064.01  
доктор технических наук, профессор

Мошкарин А. В.

## **Общая характеристика работы**

### **Актуальность темы.**

Одной из важнейших проблем теплоэнергетики является защита от внутренней коррозии оборудования и трубопроводов тепловых электростанций, котельных и тепловых сетей. К числу факторов, вызывающих внутреннюю коррозию, относится присутствие в воде коррозионно-активных газов: кислорода и диоксида углерода. При неудовлетворительном качестве обработки воды значительно сокращается срок эксплуатации оборудования теплоисточников и тепловых сетей.

В отечественной и зарубежной теплоэнергетике основным методом противокоррозионной обработки питательной воды котлов и подпиточной воды систем теплоснабжения является термическая деаэрация.

Энергетические затраты на деаэрацию существенно зависят от массообменной эффективности деаэраторов.

В большинстве работ, посвященных изучению массообмена при термической деаэрации, рассматриваются различные модели взаимодействия между паром и жидкостью. Вопрос о количественной оценке предельно достижимой массообменной эффективности деаэрации никогда не рассматривался. Между тем такая оценка необходима как для определения резервов совершенствования существующих конструкций термических деаэраторов, так и для изучения возможностей снижения энергетических затрат на деаэрацию и, следовательно, теплоэнергетические установки в целом.

Качество и надежность десорбции растворенных в воде коррозионно-активных газов при термической деаэрации и ее энергетическая эффективность в значительной мере определяются эффективностью отвода пара (смеси выделившихся из воды неконденсирующихся газов и несконденсировавшейся части десорбирующего агента) из деаэратора.

Настоящая работа посвящена изучению влияния пара и способов его утилизации на эффективность процесса деаэрации воды.

Работа выполнена в рамках подпрограммы (206) «Топливо и энергетика» программы Министерства образования Российской Федерации «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», код проекта 01.01.025.

**Целью настоящей работы** является повышение массообменной и энергетической эффективности процесса термической деаэрации воды на тепловых электростанциях.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- выполнена теоретическая оценка величины минимально возможного количества выпара термических деаэраторов, соответствующего предельной массообменной эффективности деаэрации;
- экспериментально доказана техническая возможность многократного снижения технологически необходимого количества отводимого из термических деаэраторов выпара по отношению к установленным стандартам величинам;
- разработаны эффективные решения, обеспечивающие полную утилизацию теплоты и массы выпара деаэраторов избыточного давления;
- предложены новые технологии отвода и утилизации выпара вакуумных деаэраторов;
- разработана методика подбора газоотводящих аппаратов вакуумных деаэраторов;
- выполнен термодинамический анализ эффективности новых технологий термической деаэрации воды.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1. Впервые поставлена и решена задача определения величины минимально возможного (теоретически необходимого) количества выпара термических деаэраторов, позволяющая выполнять оценку и поиск путей повышения массообменной и энергетической эффективности термических деаэраторов.

2. В результате экспериментального исследования промышленного термического деаэратора доказана возможность существенного приближения реального расхода выпара к теоретически необходимому расходу.

3. Разработан графоаналитический метод подбора и анализа эффективности газоотводящих аппаратов вакуумных деаэрационных установок, основанный на совмещении характеристик газоотводящих аппаратов и вакуумных деаэраторов.

4. Выполнен комплекс исследований и разработок, позволяющих существенно повысить надежность и экономичность термической деаэрации за счет эффективного отвода выпара, снижения количества и утилизации теплоты и массы образующейся при деаэрации парогазовой смеси. Новизна созданных технологий подтверждена патентами РФ на изобретения.

**Достоверность и обоснованность научных положений и результатов** обусловлены проведением экспериментального исследования натурального образца деаэратора в условиях действующей ТЭЦ с применением современных средств измерений, практической проверкой предложенных технологических решений на действующих теплоэнергетических предприятиях.

### **Практическая ценность работы.**

1. Выявлены значительные резервы повышения массообменной и энергетической эффективности термических деаэраторов.
2. Разработаны технологии эффективного отвода, снижения количества и утилизации теплоты и массы отводимой парогазовой смеси.

### **Практическая реализация результатов работы.**

1. На Ульяновской ТЭЦ-3 внедрены рекомендации по снижению расхода выпара термических деаэраторов.
2. На Самарской ГРЭС приняты к использованию рекомендации по снижению потерь теплоты и массы выпара термических деаэраторов питательной воды.

### **Основные положения, выносимые на защиту.**

1. Результаты теоретической оценки величины минимально возможного количества выпара при различных рабочих параметрах термических деаэраторов и различных схемах движения в них теплоносителей.
2. Результаты экспериментального исследования промышленного деаэратора, доказывающие возможность работы термических деаэраторов с удельным расходом выпара, близким к теоретически необходимому.
3. Графоаналитический метод подбора и анализа эффективности газоотводящих аппаратов вакуумных деаэрационных установок.
4. Новые технологии транспорта и утилизации выпара термических деаэраторов.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на Второй, Третьей и Четвертой Российских научно-технических конференциях «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности» (УлГТУ, 2000 г., 2001 г., 2003 г.), на Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологий» (ИГЭУ, 2001 г.), на девятой и десятой Международных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (МЭИ, 2003 г., 2004 г.), на V Минском Международном форуме по теплообмену (2004 г.), на ежегодных СНТК УлГТУ (2000-2003 гг.), на научных конференциях профессорско-преподавательского состава УлГТУ (2002-2004 гг.), на заседаниях постоянно действующего семинара НИЛ «Теплоэнергетические системы и установки» УлГТУ (2000-2004 гг.). Результаты работы неоднократно отмечались дипломами и медалями Российских научных конкурсов и выставок.

**Публикации.** По теме диссертации опубликована 51 печатная работа (в том числе одна монография, 17 статей и полных текстов докладов, тезисы 3 докладов, 29 изобретений, свидетельство о регистрации программы для ЭВМ).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, приложения, содержит список литературы из 155 наименований. Общий объем работы составляет 150 страниц машинописного текста.

## **Основное содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, дана общая характеристика работы, показаны научная ценность и практическая значимость полученных результатов.

**Первая глава** посвящена анализу литературных данных о свойствах водных растворов коррозионно-активных газов, массообмене в двухфазной среде при термической деаэрации, влиянии отводимого из деаэратора выпара на массообмен в термических деаэраторах. Рассмотрены существующие технологии удаления растворенных коррозионно-активных газов, основные конструкции оборудования для отвода выпара деаэраторов различных типов, поставлены задачи исследования.

Качество и надежность удаления растворенных в воде коррозионно-активных газов при термической деаэрации, ее массообменная и энергетическая эффективность в значительной мере определяются эффективностью отвода выпара из деаэратора. Регламентированные стандартом значения максимального технологически необходимого расхода выпара составляют 1,5 кг/т для деаэраторов повышенного давления, 2,0 кг/т для атмосферных и 5,0 кг/т для вакуумных деаэраторов.

Отмечено, что данные в ГОСТ значения не имеют достаточного экспериментального или какого-либо теоретического обоснования. Наблюдения, сделанные на ряде электростанций, показывают, что действительный расход выпара, как правило, в несколько раз превышает нормативный. Замер расхода выпара не производится при эксплуатации станций, а запорный орган на трубопроводе выпара обычно поддерживается в полностью открытом состоянии, то есть расход выпара соответствует пропускной способности трубопровода. Потери теплоты и конденсата выпара при этом весьма значительны.

Результаты обследования также показали, что на многих электростанциях теплота и масса выпара не утилизируются. Обычно это объясняется низкой надежностью устройств для отвода и утилизации выпара из-за коррозионных повреждений их поверхностей нагрева. В этих условиях повышенный расход выпара приводит к ощутимому понижению экономичности электростанций.

Следовательно, актуальнейшей задачей является определение величины технологически требуемого количества выпара термических деаэраторов, разработка решений, направленных на снижение расхода выпара до технологически требуемого минимума и полную утилизацию теплоты и массы отводимой паровоздушной смеси.

**Во второй главе** выполнена оценка величины минимально возможного (теоретически необходимого) количества выпара термических деаэраторов и изложены результаты экспериментального исследования промышленного термического деаэратора, проведенного автором в 2003-2004 гг. на Ульяновской ТЭЦ-3.

В основу методики определения теоретического удельного расхода выпара  $d_{\text{вып}}^{\text{min}}$ , кг/т, необходимого для удаления из воды растворенного кислорода, положено решение балансовых уравнений процессов массообмена и теплообмена при термической деаэрации с учетом конденсации части десорбирующего агента и при условии, что на выходе из деаэратора достигается равновесие между жидкой и парогазовой фазами.

При прямоточной схеме движения теплоносителей в деаэраторе

$$d_{\text{вып}}^{\text{min}} = \frac{10^3 [X_{u.в} - X_{д.в} \frac{i_n - i_{u.в}}{i_n - i_{д.в}}]}{(\frac{K_{\Gamma}}{p} - \frac{i_n - i_{\text{вып}}}{i_n - i_{д.в}}) X_{д.в}}, \quad (1)$$

при противоточной схеме движения воды и пара в аппарате

$$d_{\text{вып}}^{\text{min}} = \frac{10^3 [X_{u.в} - X_{д.в} \frac{i_n - i_{u.в}}{i_n - i_{д.в}}]}{X_{u.в} \frac{K_{\Gamma}}{p} - X_{д.в} \frac{i_n - i_{\text{вып}}}{i_n - i_{д.в}}}, \quad (2)$$

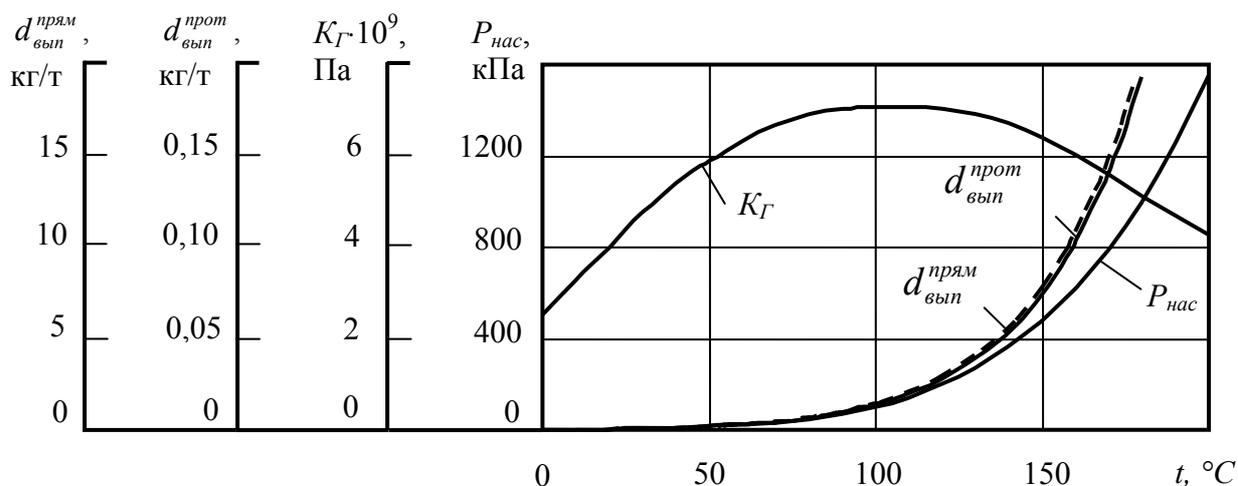
где  $X_{u.в}$ ,  $X_{д.в}$  – концентрации кислорода в воде на входе в деаэратор и на выходе из него, мкг/дм<sup>3</sup>;  $i_n$ ,  $i_{u.в}$ ,  $i_{д.в}$  – энтальпии соответственно греющего пара, исходной и деаэрированной воды, кДж/кг;  $K_{\Gamma}$  – коэффициент Генри (константа фазового равновесия), Па;  $p$  – давление в деаэраторе, Па.

Результаты расчетов по уравнениям (1) и (2) представлены на рис. 1.

Аналогичным образом выполнена оценка величины удельного расхода выпара по содержанию диоксида углерода в деаэрированной воде.

Из графика видно, что значения  $d_{\text{вып}}^{\text{min}}$  для противоточной схемы движения теплоносителей в деаэраторе существенно, практически на два порядка, меньше, чем для прямоточной схемы. При росте начальных концентраций кислорода и диоксида углерода соотношение значений теоретически

необходимого удельного расхода выпара при прямоточном и противоточном движении фаз увеличивается.



**Рис. 1.** Зависимости давления насыщенного пара, коэффициента Генри для кислорода и удельного расхода выпара при противоточном и прямоточном движениях воды и пара от температуры насыщения в деаэраторе

Интересно, что при противоточном движении теплоносителей в деаэраторе теоретически необходимый удельный расход выпара оказывается на один-два порядка ниже регламентированного стандартом значения, а при прямоточном движении – значительно выше регламентированного стандартом значения. Столь существенное различие значений реального и теоретического расходов выпара говорит о настоятельной необходимости его снижения.

На Ульяновской ТЭЦ-3 проведено экспериментальное исследование термического деаэратора, одной из основных задач которого было определение технологически необходимого расхода выпара деаэратора и сравнение этого расхода с минимальным теоретическим удельным расходом. Решение этой задачи необходимо для оценки возможности приближения реального расхода выпара к теоретически определенной величине и степени обоснованности требований стандарта.

Теоретически необходимый расход выпара  $D_{вып}^{теор}$ , т/ч, для конкретного опыта определяется по уравнению

$$D_{вып}^{теор} = \frac{G_{x.o.в} [X_{x.o.в}(i_n - i_{др.н}) - X_{др.н}(i_n - i_{x.o.в})] + G_{д.в} [X_{др.н}(i_n - i_{д.в}) - X_{д.в}(i_n - i_{др.н})]}{\frac{K_G}{p} X_{общ}(i_n - i_{др.н}) - X_{др.н}(i_n - i_{вып})} \quad (3)$$

где  $G_{x.o.в}$ ,  $G_{д.в}$  – количества исходной химически очищенной воды, подаваемой в деаэратор, и деаэрированной воды на выходе из деаэратора, т/ч;  $X_{x.o.в}$ ,  $X_{др.н}$  – концентрации кислорода в химочищенной воде на входе в деаэратор и других

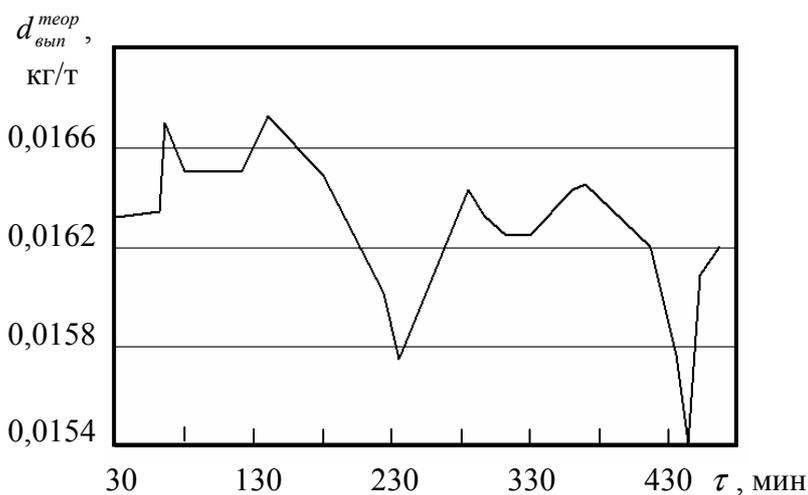
потоках (дренажах), отправляемых на деаэрацию,  $\text{мкг/дм}^3$ ;  $X_{\text{общ}}$  – общая средневзвешенная концентрация кислорода всех потоков, подводимых в деаэратор,  $\text{мкг/дм}^3$ ;  $X_{\text{д.в}}$  – концентрация кислорода в деаэрированной воде на выходе из деаэратора,  $\text{мкг/дм}^3$ ;  $K_{\text{Г}}$  – коэффициент Генри, Па;  $p$  – общее давление смеси, Па;  $i_{\text{х.о.в}}$ ,  $i_{\text{др.п}}$ ,  $i_{\text{д.в}}$  – энтальпии соответственно химически очищенной воды, других потоков, направляемых на деаэрацию, и деаэрированной воды,  $\text{кДж/кг}$ ;  $i_{\text{п}}$ ,  $i_{\text{вып}}$  – энтальпии греющего пара и выпара деаэратора,  $\text{кДж/кг}$ .

Удельный расход выпара  $d_{\text{вып}}^{\text{теор}}$ ,  $\text{кг/т}$ , (рис. 2) составит

$$d_{\text{вып}}^{\text{теор}} = 10^3 \frac{D_{\text{вып}}^{\text{теор}}}{G_{\text{х.о.в}} + G_{\text{др.п}}}, \quad (4)$$

где  $G_{\text{др.п}}$  – количество других потоков, отправляемых на деаэрацию,  $\text{т/ч}$ .

В ходе эксперимента доказана возможность существенного снижения удельного расхода выпара по сравнению с нормативным (рис. 3, 4).



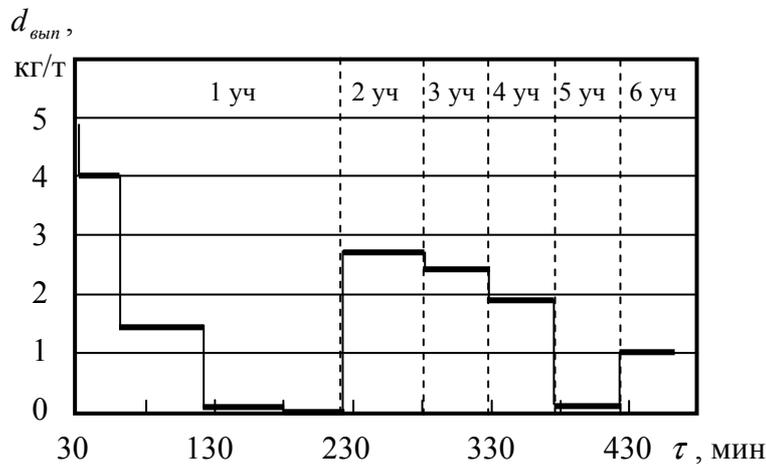
**Рис. 2.** Изменение теоретически необходимого удельного расхода выпара исследуемого деаэратора ДА-25 по времени эксперимента

На рис. 3 представлена динамика изменения регулирующего фактора  $d_{\text{вып}}$ , а на рис. 4 приведена зависимость остаточной концентрации кислорода в деаэрированной воде  $C_{\text{O}_2}$ ,  $\text{мкг/дм}^3$ , от времени при изменении расхода выпара и температуры исходной воды, построенная путем аппроксимации экспериментальных данных. Средняя дисперсия данных составляет 2,2 при уровне надежности 0,95.

Графики 2, 3 и 4 взаимосвязаны и позволяют определить количество выпара, необходимое и достаточное для достижения нормативного качества деаэрированной воды. Каждый скачок на графике 3 соответствует однократному изменению входной величины.

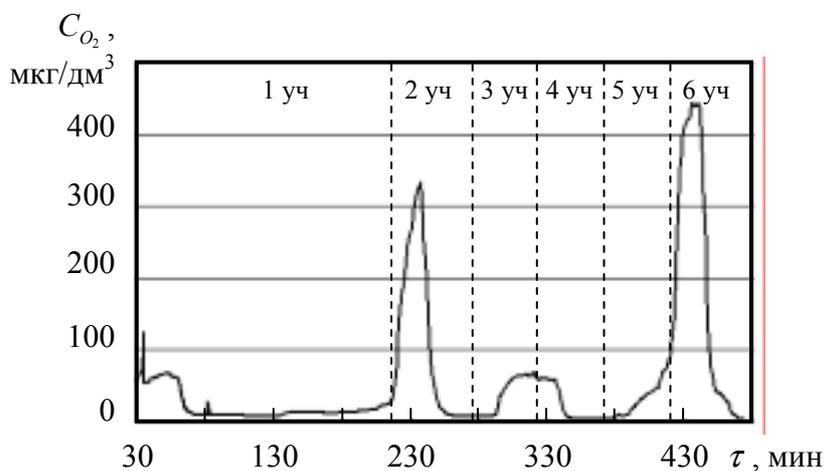
В результате экспериментального исследования работы деаэратора атмосферного давления методом активного эксперимента удалось доказать необходимость и возможность снижения нормативного удельного расхода выпара. Установлена возможность обеспечения нормативного качества

деаэрированной воды при расходе выпара 0,07-0,12 кг/т, т.е. при существенном приближении к величине теоретического удельного расхода выпара и примерно в 20-25 раз ниже нормативного. Доказано, что нормативной эффективности деаэрации воды в атмосферных деаэраторах удается достигнуть при температуре исходной воды 30-45 °С и при средней величине нагрева деаэрируемых потоков 40-60 °С.



**Рис. 3.** Динамика изменения фактического удельного расхода выпара деаэратора ДА-25

1 участок – снижение расхода выпара с 4,81 кг/т до 0,03 кг/т при поэтапном закрытии задвижки (температура исходной воды 50 °С); 2 участок – увеличение расхода выпара; 3 участок – увеличение температуры исходной воды до 85 °С; 4 участок – понижение температуры исходной воды до 35 °С; 5 участок – снижение расхода выпара (температура исходной воды 35 °С); 6 участок – увеличение расхода выпара

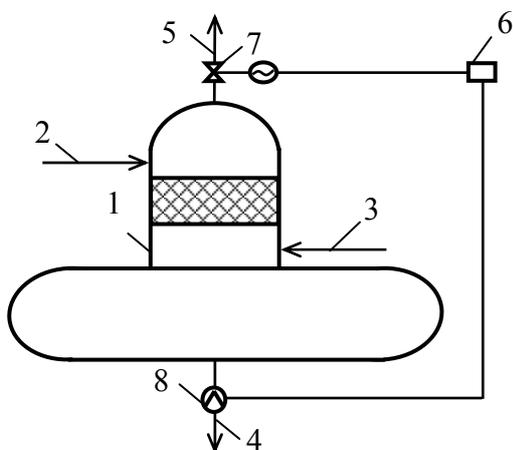


**Рис. 4.** Динамика изменения остаточной концентрации кислорода в деаэрированной воде при различных величинах расхода выпара и температуры исходной воды

Разработанные по результатам эксперимента рекомендации по режимам термической деаэрации с пониженным удельным расходом выпара были немедленно внедрены на Ульяновской ТЭЦ-3, что позволило существенно повысить экономичность установки за счет снижения потерь теплоты с отводимым выпаром и снижения затрат энергии на перекачку конденсата охладителя выпара.

В главе также рассмотрен ряд технологий регулирования и снижения расхода выпара деаэраторов до технологически требуемого минимума,

позволяющих значительно уменьшить энергетические затраты на процесс деаэрации, например, пропорциональное регулирование расхода пара по расходу деаэрированной воды (рис. 5).



**Рис. 5.** Деаэрационная установка с регулированием расхода пара пропорционально расходу деаэрированной воды: 1 – термический деаэратор; 2, 3, 4, 5 – трубопроводы исходной воды, греющего агента, деаэрированной воды и пара; 6 – регулятор расхода пара; 7 – регулирующий орган на трубопроводе пара; 8 – датчик расхода обрабатываемой воды

Регулирование расхода пара производится регулятором расхода, связанным с установленным на трубопроводе пара регулирующим органом и соединенным с датчиком расхода деаэрированной воды.

**Третья глава** посвящена разработке решений, обеспечивающих полную утилизацию теплоты и массы пара деаэраторов избыточного давления.

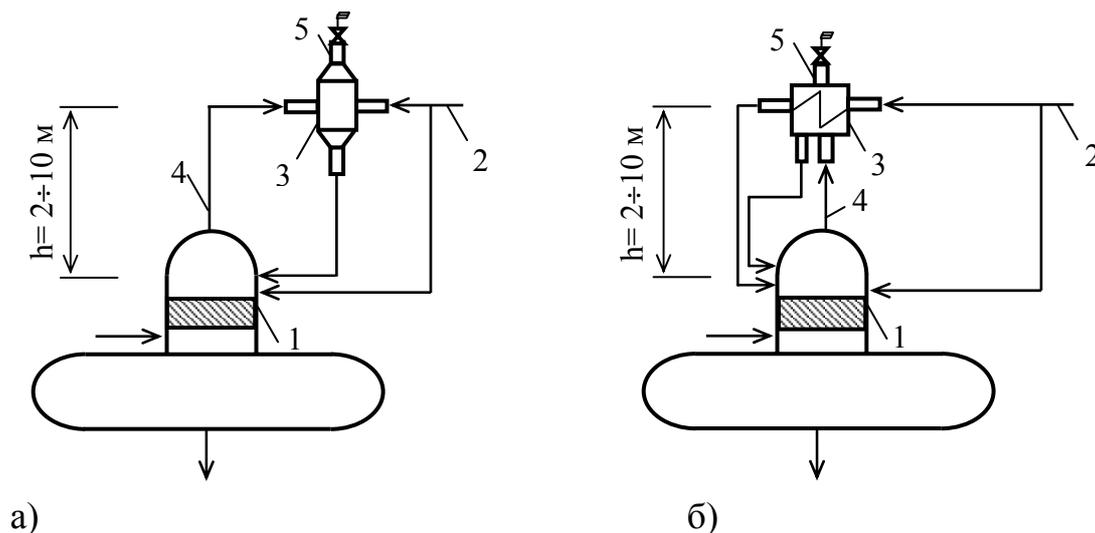
Для конденсации пара из отводимой паровоздушной смеси и утилизации тепла и конденсата этого пара используются охладители пара. Однако нередко пар просто выбрасывается в атмосферу, а существующие методы использования пара имеют большие резервы для их совершенствования.

На отечественных электростанциях преимущественное распространение получили охладители пара поверхностного типа, эксплуатация которых сопровождается рядом трудностей вследствие коррозии трубок охладителя, вызываемой коррозионно-агрессивными газами, содержащимися в значительных количествах в удаляемой паровоздушной смеси.

Несмотря на то, что охладитель пара, согласно нормативным материалам, является обязательным элементом деаэрационной установки, вопрос о расположении охладителя относительно колонки деаэратора никогда не ставился. Тем не менее, о том, что выбор высоты расположения охладителя пара над деаэрационной колонкой не является очевидным, свидетельствуют многочисленные примеры. Практически на всех тепловых электростанциях охладитель пара установлен на отметке обслуживания деаэратора. В результате этого возврат теплоносителя после охладителя в деаэрационную колонку невозможен. Конденсат пара после охладителя поверхностного типа, или смесь конденсата пара и охлаждающей воды после охладителя смешива-

ющего типа, отводятся в дренажные баки. Это приводит к ощутимым потерям теплоты и массы конденсата выпара.

Повысить экономичность процесса термической деаэрации можно с помощью представленных на рис. 6 схем, которые предусматривают установку охладителей выпара над деаэрационными колонками на высоте, при которой обеспечивается надежный и полный возврат охлажденного исходной водой выпара в колонку деаэратора и предотвращается унос ценного теплоносителя по трубопроводу отвода неконденсирующихся газов в атмосферу.



**Рис. 6.** Включение охладителей выпара в деаэрационную установку: 1 – термический деаэратор атмосферного давления; 2 – трубопровод исходной воды; 3 – охладитель выпара (а – смешивающего типа, б – поверхностного типа); 4 – трубопровод отвода выпара; 5 – трубопровод отвода неконденсирующихся газов

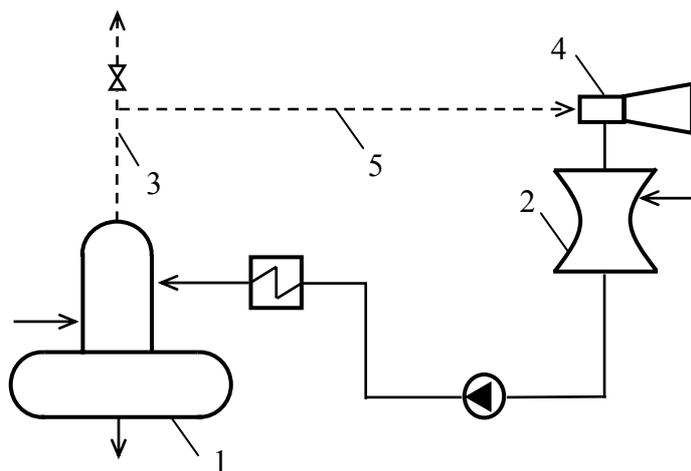
Высоту расположения охладителя выпара  $h$ , м, над деаэрационной колонкой избыточного давления можно определить по формуле

$$h \geq \frac{p_d - p_{охл}}{\rho g}, \quad (3)$$

где  $p_d$ ,  $p_{охл}$  – рабочее давление соответственно в деаэраторе и паровом пространстве охладителя, Па;  $\rho$  – плотность конденсата выпара (или смеси конденсата выпара и охлаждающей воды) при давлении в охладителе, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

В диссертации разработаны способы полной утилизации теплоты и массы выпара деаэраторов избыточного давления с применением охладителей выпара смешивающего типа (например, рис. 6а). По другому решению смесь после охладителя непосредственно подается на деаэрацию в верхнюю часть деаэрационной колонки, а неконденсирующиеся газы удаляются из охладителя в атмосферу, что позволяет обеспечить утилизацию как теплоты, так и массы выпара.

При двухступенчатой схеме дегазации воды тепловых электростанций целесообразно выпар деаэраторов повышенного давления использовать в деаэраторах атмосферного давления. В случае подготовки добавочной питательной воды в вакуумном деаэраторе возможно использование выпара деаэраторов повышенного или атмосферного давления в качестве греющего пара вакуумных деаэраторов, или применение схемы деаэрационной установки (рис. 7), по которой выпар деаэратора повышенного давления используется в качестве рабочего пара пароструйного эжектора вакуумного деаэратора.



**Рис. 7.** Схема использования выпара деаэратора повышенного давления в качестве рабочего пара эжектора: 1 – деаэратор повышенного давления; 2 – вакуумный деаэратор; 3 – трубопровод отвода выпара деаэратора повышенного давления; 4 – пароструйный эжектор; 5 – трубопровод рабочего пара эжектора

Критерием для оценки энергетической эффективности различных схем использования теплоты и массы выпара целесообразно принять величину потерь эксергии выпара. Этот метод основан на понятии эксергии, как максимально возможной работы, которую можно получить за счет имеющейся энергии системы в заданных условиях окружающей среды.

В общем виде потери эксергии с выпаром  $E_{вып}^{nom}$ , кДж, рассчитываются по формуле

$$E_{вып}^{nom} = E_{б.у}^{nom} - \sum E_{полезн}, \quad (4)$$

где  $E_{б.у}^{nom}$  – потери эксергии при выбросе выпара в атмосферу без какой-либо утилизации, кДж;

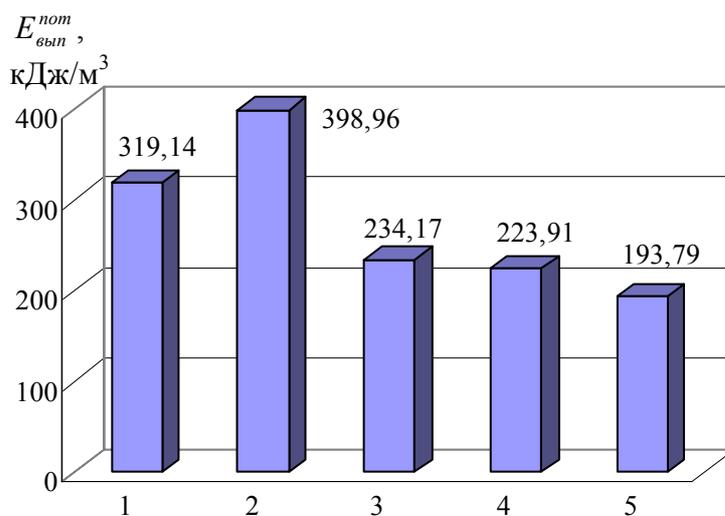
$$E_{б.у}^{nom} = D_{вып} [i_{вып} - i_0 - T_0 (s_{вып} - s_0)], \quad (5)$$

$\sum E_{полезн}$  – полезно используемая эксергия выпара, кДж;  $D_{вып}$  – количество выпара деаэратора, кг;  $T_0$  – температура окружающей среды, принимаем среднегодовую  $T_0 = 283$  К;  $i_0, i_{вып}$  – энтальпии конденсата пара при температуре  $T_0$  и насыщенного пара, содержащегося в выпаре, при давлении в деаэраторе, кДж/кг;  $s_0, s_{вып}$  – энтропии конденсата пара при температуре  $T_0$  и насыщенного пара, содержащегося в выпаре, при давлении в деаэраторе, кДж/(кг·К).

Первая составляющая в выражении (4)  $E_{\sigma,y}^{nom}$  является постоянной величиной, зависящей только от типа (атмосферного или повышенного давления) и производительности деаэратора. Изменяется полезно используемая эксергия, превращенная в работу  $L_{вып}$  и (или) теплоту  $Q_{вып}$ , используемую в дальнейшем в цикле теплоэнергетической установки.

Результаты оценки эксергетической эффективности рассмотренных технологий представлены на рис. 8. Из графика следует, что наиболее полно утилизация выпара осуществляется при использовании его в качестве рабочей среды пароструйного эжектора. При использовании этого решения на ТЭЦ с расходом деаэрированной воды 3000 т/ч годовая экономия составляет около 6000 тонн условного топлива.

Сравнительно небольшие потери эксергии при утилизации выпара в охладителях связаны с тем, что энергия выпара деаэратора повышенного давления расходуется на нагрев высокопотенциального потока основного конденсата, который возвращает в цикл значительное количество эксергии (температура основного конденсата после охладителей смешивающего и поверхностного типов составляет  $\approx 147$  °C).



**Рис. 8.** Потери эксергии при различных способах утилизации выпара деаэратора повышенного давления: 1 – использование выпара в качестве греющего агента в атмосферном деаэраторе; 2 – использование выпара в качестве греющего агента в вакуумном деаэраторе; 3 – утилизация выпара в поверхностном охладителе выпара; 4 – утилизация выпара в смешивающем охладителе выпара; 5 – использование выпара в пароструйном эжекторе

В то же время при использовании выпара в атмосферных или вакуумных деаэраторах, несмотря на совершаемую работу выпара в качестве десорбирующего агента, с деаэрированной водой в цикл станции возвращается малая часть эксергии (температура воды после атмосферного деаэратора 104 °C, после вакуумного – 60 °C).

Аналогично выполнен расчет энергетической эффективности технологий утилизации выпара деаэратора атмосферного давления. Поскольку потенциал выпара атмосферного деаэратора ниже, чем деаэратора повышенного давления, использование теплоты и массы этого выпара возможно только в вакуумных деаэраторах и охладителях поверхностного или смешивающего типа.

**В четвертой главе** выполнен комплекс исследований, направленных на повышение энергетической эффективности вакуумных деаэрационных установок.

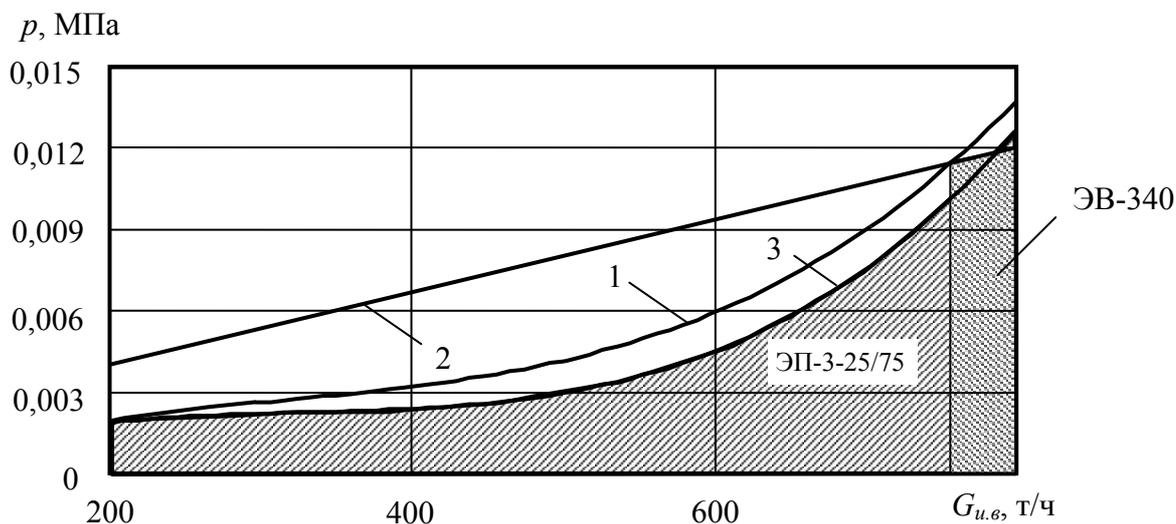
Важнейшими элементами вакуумных деаэрационных установок являются газоотводящие аппараты. Эффективность устройства для отвода выпара оказывает на качество деаэрации столь же большое влияние, как и степень совершенства конструкции собственно деаэратора, поскольку с их отказами связано до 50 % нарушений режимов вакуумной деаэрации воды. В значительной мере неудовлетворительная работа многих вакуумных деаэрационных установок связана с неправильным подбором газоотводящих аппаратов. В вакуумных деаэрационных установках применяются струйные аппараты – водоструйные и пароструйные эжекторы, а также механические вакуумные насосы.

Автором разработан графоаналитический метод подбора струйных аппаратов вакуумных деаэрационных установок, заключающийся в определении соответствия давления всасывания водоструйных и пароструйных эжекторов требуемому разрежению в деаэраторе путем наложения графических характеристик вакуумных деаэраторов и газоотводящих аппаратов. Разработанная методика также позволяет выбрать параметры газоотводящего аппарата. Кроме того, на существующих вакуумных деаэрационных установках эта методика позволяет выбрать оптимальные режимы деаэрации, соответствующие установленным газоотводящим аппаратом.

В качестве примера применения методики рассмотрена работа деаэрационной установки с горизонтальным вакуумным деаэратором струйно-барботажного типа ДВ-800. На рис. 9 показана зависимость нагрузки деаэратора от рабочего давления в нем (линия 1), построенная при следующих условиях: температура и расход греющего агента постоянны и равны соответственно 90 °С и 125 т/ч, повышение температурного уровня процесса с увеличением нагрузки осуществляется за счет изменения температуры исходной воды от 15 до 50 °С. Здесь же изображены зависимости давления всасывания струйных эжекторов от расхода воздуха, соответствующего данной нагрузке (линии 2, 3).

Из анализа графика на рис. 9 следует, что для данных температурных режимов вакуумной деаэрации эффективный отвод выпара из деаэратора ДВ-800 может быть обеспечен пароструйным эжектором ЭП-3-25/75 во всем диапазоне нагрузок. Водоструйный эжектор ЭВ-340, напротив, не обеспечивает требуемой глубины разрежения в деаэраторе, так как характеристика эжектора

лежит выше характеристики деаэрата. Для обеспечения эффективного отвода пара из деаэрата ДВ-800 при выбранном температурном режиме необходимо подобрать более мощный водоструйный эжектор. С другой стороны, использование эжектора ЭВ-340 возможно при повышении температурного уровня вакуумной деаэрации и соответствующем подъеме характеристики деаэрата.



**Рис. 9.** К методике подбора струйных эжекторов для вакуумного деаэрата: 1 – зависимость нагрузки вакуумного деаэрата ДВ-800 от рабочего давления при  $t_{за} = 90$  °С,  $G_{за} = 125$  т/ч, повышении  $t_{у.в}$  от 15 до 50 °С; 2, 3 – зависимости давления всасывания водоструйного эжектора ЭВ-340 и давления всасывания пароструйного эжектора ЭП-3-25/75 от расхода воздуха, соответствующего нагрузке деаэрата. Заштрихованы рабочие области режимов вакуумной деаэрационной установки, при которых обеспечивается эффективный отвод пара деаэрата

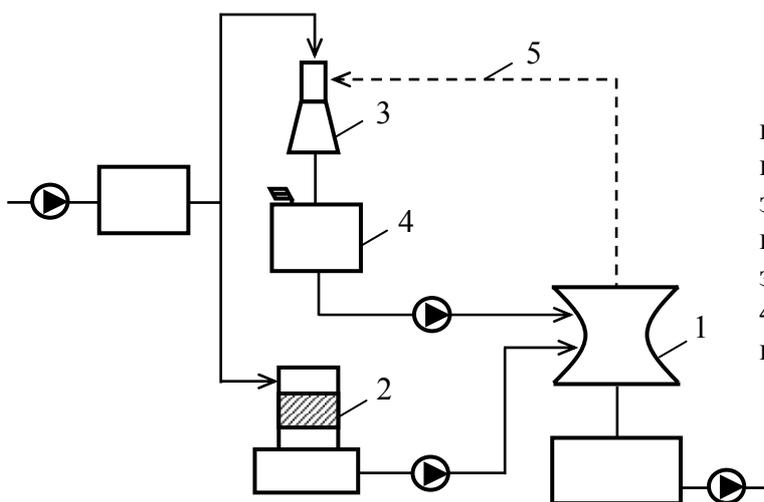
Экономичность вакуумной деаэрации определяется, прежде всего, ее температурным уровнем: чем ниже температурный уровень, тем выше тепловая экономичность. Выполненный эксергетический анализ показывает, что затраты на работу эжекторов практически на два порядка ниже экономии, которая может быть получена от понижения температурного уровня процесса деаэрации. Следовательно, при выборе режима работы вакуумных деаэрационных установок и типа газоотводящих аппаратов следует ориентироваться на работу деаэраторов с минимальными температурами теплоносителей.

Эффективность водоструйных эжекторов зависит от схемы их включения в вакуумную деаэрационную установку.

В процессе отвода пара водоструйными эжекторами химически очищенная вода, используемая в качестве рабочей среды, насыщается кислородом и сливается в бак-газоотделитель в виде газовой эмульсии. Тем самым, в баке создаются оптимальные условия для десорбции свободного диоксида углерода  $CO_2$ . Этот полезный эффект может быть использован при

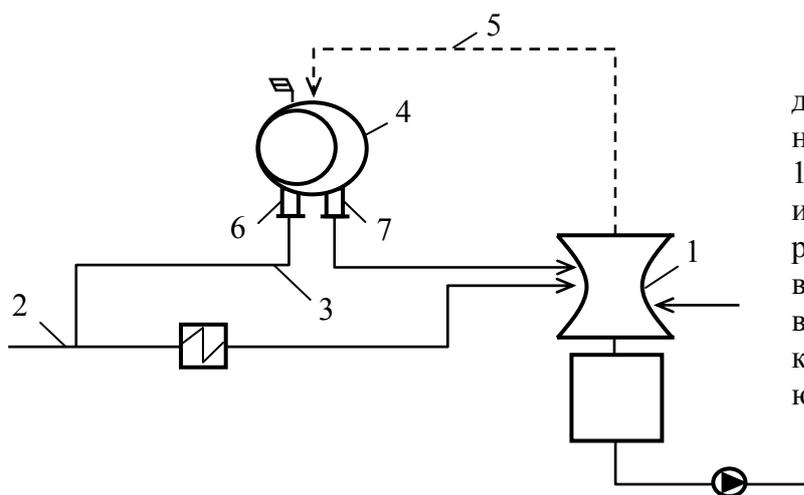
параллельном включении водоструйного эжектора с баком-газоотделителем и декарбонизатора (рис. 10).

Такое включение позволяет существенно сократить затраты на декарбонизацию подпиточной воды на величину расхода электроэнергии на транспорт рабочей воды и уменьшить капитальные затраты благодаря снижению производительности декарбонизаторов. При незначительных нагрузках вакуумного деаэратора декарбонизатор может быть полностью отключен.



**Рис. 10.** Схема водоподготовительной установки с параллельным включением водоструйного эжектора и декарбонизатора: 1 – вакуумный деаэратор; 2 – декарбонизатор; 3 – водоструйный эжектор; 4 – бак-газоотделитель; 5 – трубопровод отвода пара

Автором разработан ряд технических решений, направленных на повышение экономичности вакуумных деаэрационных установок с механическими вакуумными насосами.



**Рис. 11.** Схема вакуумной деаэрационной установки с механическим вакуумным насосом: 1 – деаэратор; 2 – трубопровод исходной воды; 3 – трубопровод рабочей воды; 4 – механический вакуумный насос; 5 – трубопровод отвода пара; 6, 7 – патрубки подвода и отвода охлаждающей воды

На рис. 11 представлена схема реализации одного из новых решений, позволяющая утилизировать теплоту пара деаэратора и теплоту рабочей воды насоса. На механический вакуумный насос в качестве рабочей охлаждающей воды, как правило, подается техническая вода, которая после насоса вместе с паром сливается в канализацию (барботер). Подача части

исходной воды вакуумного деаэрата на механический насос с направлением использованной в насосе воды в вакуумный деаэратор позволяет исключить потери с теплотой отводимого из деаэрата выпара и теплотой рабочей воды насоса. Соответственно сокращаются и затраты на транспортировку охлаждающей воды насоса.

В ряде режимов деаэрации расход удаляемого из деаэрата выпара поддерживается недостаточным для достижения требуемого качества дегазации, в других режимах – напротив, избыточным. Повышение качества и экономичности вакуумной деаэрации воды достигается за счет регулирования работы электропривода механического вакуумного насоса и поддержания, тем самым, оптимального режима работы насоса.

Термодинамический анализ разработанных технологий отвода и утилизации выпара вакуумных деаэраторов показывает, что новые технологии позволяют значительно сократить энергетические затраты на осуществление процесса деаэрации и обеспечить повышение эффективности работы оборудования для противокоррозионной обработки подпиточной воды.

### **Основные результаты**

1. В диссертации выполнен комплекс научно-обоснованных технологических разработок, позволяющих повысить эффективность процесса термической деаэрации воды на тепловых электростанциях.

2. Впервые поставлена и решена актуальная научная задача определения величины минимально возможного (теоретически необходимого) количества выпара термических деаэраторов. Знание величины, с одной стороны, – минимально возможного и, с другой стороны, – технологически необходимого (фактического) количества выпара позволяет оценить массообменную эффективность термических деаэраторов и определить направления поиска путей повышения качества и экономичности процесса деаэрации.

3. В результате промышленного эксперимента доказана техническая возможность снижения технологически необходимого количества отводимого из деаэрата выпара до величин существенно, на 1-2 порядка, ниже установленных стандартом значений.

4. Разработаны технологии регулирования и снижения расхода выпара до технологически требуемого минимума, позволяющие значительно снизить энергетические затраты на процесс термической деаэрации.

5. Разработаны решения, обеспечивающие полную утилизацию теплоты и массы выпара деаэраторов избыточного давления. Оценены энергетические затраты на осуществление новых технологий отвода и утилизации выпара термических деаэраторов.

6. Разработана методика подбора газоотводящих аппаратов вакуумных деаэраторов, основанная на исследовании соответствия давления всасывания водоструйных и пароструйных эжекторов требуемому разрежению в деаэраторе. Методика позволяет определить температурные режимы вакуумной деаэрации, при которых выбранный эжектор будет справляться с отводом пара из деаэраторов. Установлено, что в режимах вакуумной деаэрации с пониженными температурами теплоносителей получаемый выигрыш в энергетической эффективности ТЭЦ существенно превосходит дополнительные энергетические затраты на работу газоотводящих аппаратов в этих режимах.

7. Предложены новые технологии отвода и утилизации пара вакуумных деаэраторов, позволяющие значительно сократить энергетические затраты на осуществление процесса деаэрации и обеспечить повышение эффективности работы оборудования для противокоррозионной обработки подпиточной воды. Выполнен термодинамический анализ эффективности новых способов вакуумной деаэрации воды.

#### **Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

1. Малинина О. В. Технологии транспорта и утилизации пара термических деаэраторов // Проблемы энергетики. Известия вузов. 2004. № 3-4. С. 100-111.

2. Шарапов В. И., Малинина О. В. Определение теоретически необходимого количества пара термических деаэраторов // Теплоэнергетика. 2004. № 4. С. 63-66.

3. Шарапов В. И., Малинина О. В. Методика выбора газоотводящих аппаратов вакуумных деаэрационных установок // Промышленная энергетика. 2002. № 9. С. 37-40.

4. Шарапов В. И., Малинина О. В., Цюра Д. В. О предельной массообменной и энергетической эффективности термических деаэраторов // Энергосбережение и водоподготовка. 2003. № 2. С. 61-64.

5. Малинина О. В., Цюра Д. В., Шарапов В. И. Оценка предельно возможной тепломассообменной эффективности термических деаэраторов // Материалы V Минского Международного форума по тепло- и массообмену. Том 2. Минск: НАНБ. 2004. С. 312-314.

6. Шарапов В. И., Малинина О. В. Технологии отвода и утилизации пара термических деаэраторов. Ульяновск: УлГТУ. 2004. 180 с. (монография).

7. Малинина О. В. Совершенствование технологий отвода пара термических деаэраторов // Теплоэнергетика и теплоснабжение. Сборник научных трудов научно-исследовательской лаборатории «Теплоэнергетические системы и установки». Выпуск 1. Ульяновск: УлГТУ. 2002. С. 150-159.

8. Малинина О. В., Шарапов В. И. Охладители пара термических деаэраторов // Вестник УлГТУ. 2002. № 3. С. 96-100.

9. Цюра Д. В., Малинина О. В., Шарапов В. И. Регулирование расхода пара термических деаэраторов // Материалы Четвертой Российской научно-

технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». Том 2. Ульяновск: УлГТУ. 2003. С. 279-282.

10. Шарапов В. И., Малинина О. В., Кувшинов О.Н. Схемы включения водоструйных эжекторов вакуумных деаэрационных установок // Научно-технический калейдоскоп. 2000. № 3. С. 105-108.

11. Шарапов В. И., Малинина О. В., Цюра Д. В. Технологии отвода пара из деаэраторов повышенного и атмосферного давления // Материалы Третьей Российской научно-технической конференции «Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности». Том. 2. Ульяновск: УлГТУ. 2001. С. 293-296.

12. Sharapov V.I., Malinina O.V. Determining the Theoretically Required Vapor-Venting Rate for Thermal Deaerators // Thermal Engineering (USA). 2004. Vol. 51. № 4. P. 321-324.

13. Патент 2174102 RU. Способ термической деаэрации питательной воды тепловой электростанции / В. И. Шарапов, О. В. Малинина, Е. В. Макарова, М. А. Башкарев // Бюллетень изобретений. 2001. № 27.

14. Патент 2177450 RU. Способ подготовки подпиточной воды теплосети / В. И. Шарапов, О. Н. Кувшинов, О. В. Малинина // Бюллетень изобретений. 2001. № 36.

15. Патент 2182116 RU. Способ термической деаэрации воды / В. И. Шарапов, О. В. Малинина, Е. В. Макарова // Бюллетень изобретений. 2002. № 13.

16. Патент 2197431 RU. Способ вакуумной деаэрации воды / В. И. Шарапов, О. В. Малинина // Бюллетень изобретений. 2003. № 3.

17. Патент 2203857 RU. Способ термической деаэрации воды / В. И. Шарапов, О. В. Малинина // Бюллетень изобретений. 2003. № 13.

18. Патент 2203858 RU. Способ вакуумной деаэрации воды / В. И. Шарапов, О. В. Малинина // Бюллетень изобретений. 2003. № 13.

19. Патент 2210542 RU. Способ термической деаэрации воды / В. И. Шарапов, О. В. Малинина // Бюллетень изобретений. 2003. № 23.

20. Патент 2210543 RU. Способ термической деаэрации воды / В. И. Шарапов, О. В. Малинина // Бюллетень изобретений. 2003. № 23.

21. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2003612256. Расчет энергетической эффективности технологий подогрева воды на ТЭЦ, v 1.0 / П. Б. Пазушкин, В. И. Шарапов, О. В. Малинина и др. // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топология интегральных микросхем. 2003.

Малинина Ольга Владимировна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСХОДА ВЫПАРА  
И СПОСОБОВ ЕГО УТИЛИЗАЦИИ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕАЭРАЦИИ ВОДЫ**

Подписано в печать 25.10.04. Формат 60x84/16.

Бумага писчая. Усл.печ.л. 1,16. Уч.-изд.л. 1,00

Тираж 70 экз. Заказ

Типография УлГТУ. 432027, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32.