

В диссертационный совет Д 212.064.01
при ФГБОУ ВО «Ивановский государ-
ственный энергетический университет
имени В.И. Ленина»

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34

ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертационную работу БАРОЧКИНА
Юрия Евгеньевича «Совершенствование технологических систем ТЭС
с применением кавитационно-струйного деаэратора»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.14.14 –Тепловые электрические станции, их энергетиче-
ские системы и агрегаты

Актуальность темы диссертации

Термическая деаэрация теплоносителя является основным средством ограничения скорости коррозии оборудования и трубопроводов энергетических установок. Деаэрации подвергают питательную воду паровых котлов, добавочную воду основного цикла тепловых электростанций, подпиточную воду тепловых сетей и прочие теплоносители.

Аппаратное обеспечение технологии термической деаэрации в энергетической отрасли в достаточной степени отработано: применяются высокоэффективные деаэраторы, конструктивные схемы которых часто объединяют несколько различных типов деаэрационных элементов (струйные отсеки; насадочные, барботажные, форсуночные устройства и др.). Термический деаэратор энергетической установки представляет собой довольно громоздкий аппарат со сложной конфигурацией обеспечивающих его работу технологических систем подачи и отвода воды, подачи греющего пара, отвода выпара, систем защиты и автоматического регулирования.

Однако данные технологические установки можно эксплуатировать не во всех случаях, при которых необходимо обеспечить термическую деаэрацию теплоносителя: ограничения могут быть введены как по массогабаритным характеристикам, так и вследствие невозможности или нецелесообразности использования греющего пара и нагрева деаэрируемой воды. В диссертации Барочкина Ю.Е. в качестве объектов исследования рассматриваются именно такие особые варианты технологических систем ТЭС, которые требуют применения нестандартных, нетиповых для тепловых электростанций

подходов для решения проблем деаэрации. Заметим, что к таким нестандартным решениям относятся методы, которые привлекаются в «малой» энергетике, например, в водогрейных котельных и на корабельных энергетических установках. Внимание автора обращено именно к данной категории устройств, в том числе деаэраторам перегретой воды кавитационно-струйного типа.

Необходимо отметить актуальность диссертационной работы Барочкина Ю.Е. как в теоретическом плане (касательно моделирования технологических процессов, которые происходят при вскипании попадающей в зону разрежения перегретой воды в деаэрационных устройствах), так в практическом (при поиске решений проблемы обеспечения коррозионной защиты оборудования в системах электростанций и оценке эффективности применения кавитационно-струйных деаэраторов).

Новизна, достоверность и степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научная новизна диссертации сформулирована автором следующим образом:

1. Разработана математическая модель процесса деаэрации воды в устройствах, работающих без подачи греющего теплоносителя при вскипании попадающей в зону разрежения перегретой воды. Единственный параметр идентификации модели определен по экспериментальным данным. Доказана адекватность предложенной модели применительно к центробежно-вихревым, кавитационно-струйным, капельным деаэрационным устройствам.

Математическая модель, обсуждаемая в п. 1, действительно составляет научную новизну диссертации: впервые получена обладающая приемлемой точностью статистическая модель, описывающая процесс деаэрации перегретой воды в различающихся по конструкции деаэрационных устройствах. Адекватность модели и её точность вполне **обоснованы** в диссертации. Преимуществом и отличительной особенностью модели является её слабая зависимость от эмпирических «настроенных» коэффициентов: модель содержит единственный параметр идентификации.

2. В программном комплексе FlowVision разработана имитационная модель активной зоны кавитационно-струйного деаэратора, позволяющая определять влияющие на эффективность деаэрации воды характеристики

потоков воды и парогазовой смеси при изменении конструкции элементов, режима подачи исходной воды и отвода выпара.

Реализованная в программном комплексе вычислительной гидродинамики модель активной зоны кавитационно-струйного деаэратора позволила автору впервые определить количественно взаимосвязь статического и полного давления потоков теплоносителей в различных точках деаэратора с режимными и конструктивными параметрами. Несмотря на то, что рассматриваемая гидродинамическая задача решалась в упрощенной постановке, проведенные на модели численные эксперименты показали не противоречащие наблюдаемым физическим процессам результаты. Это указывает на правомерность сделанных при формировании модели допущений. **Обоснованность** модели обеспечивается также её разработкой с опорой на опубликованные результаты численного моделирования вихревых и закрученных потоков.

3. *На основе предложенной математической модели процесса деаэрации попадающей в зону разрежения перегретой воды с использованием результатов моделирования в программном комплексе FlowVision, а также известных методов расчета гидродинамических режимов технических систем разработана математическая модель кавитационно-струйного деаэратора, позволяющая определять эффект деаэрации для заданного теплогидравлического режима с учетом показателей работы тракта отсоса выпара.*

В результате синтеза двух разработанных моделей автором получен эффективный математический инструмент, обеспечивающий определение показателей качества деаэрации воды в аппарате рассматриваемого типа при изменении условий его эксплуатации.

Таким образом, по содержанию диссертация Барочкина Ю.Е. является завершённым научным исследованием, состоит из введения, четырех глав, основных выводов и 2 приложений. **Обоснованность** выводов и рекомендаций диссертации основана на использовании научных методов исследования и полученных практических результатов выполненной работы. **Достоверность** полученных результатов основана в области теории: на апробированных методах математического моделирования статистического и имитационного характера; на удовлетворительном согласии указанных результатов автора, опубликованных по теме диссертации, с фактическими опытными показателями работы кавитационно-струйный деаэраторов при промышленной эксплуатации по обзору из открытых источников и данных других исследователей.

Основные научные результаты опубликованы в необходимом объеме в научных изданиях по списку ВАК. В диссертации соискателем даны кор-

ректные ссылки на источники, откуда заимствуются сведения и научные результаты, принадлежащие другим авторам.

Значимость результатов, полученных в диссертации, для науки и практики

Теоретическая значимость исследования отражается в изучении влияния режимных параметров кавитационно-струйного деаэрата на эффективность деаэрации: воды и теплоносителя в технологических системах ТЭС при включении в них кавитационно-струйного деаэрата, в том числе при модернизации математической модели процесса деаэрации после попадания перегретой воды в зону разрежения с помощью введения дополнительного параметра идентификации, определяемого из результатов экспериментальных исследований.

Практическая значимость диссертации обусловлена возможностью непосредственного использования отдельных результатов работы (разработанных и модернизированных технических решений с системой практических рекомендаций по их применению) при проектировании новых или совершенствовании действующих энергетических установок и технологических систем электростанций. Ряд полученных в диссертации результатов уже используется в промышленности либо принят к более детальной проработке в теплоэнергетике, о чем свидетельствуют акты внедрения.

Оценка содержания диссертации и автореферата

Представленная к защите диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов и результатов, списка литературы из 178 наименований и 2 приложений. Основной текст изложен на 165 страницах, диссертация содержит 66 рисунков и 11 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель работы и основные положения, вынесенные на защиту.

Первую главу соискатель посвятил подробному обоснованию цели и формированию задач исследования, современному состоянию проблемы термической деаэрации в системах обеспечения водно-химического режима теплоэнергетических установок и моделирования данного технологического процесса.

В частности, выполнен анализ известных литературных источников: -по соответствующим конструкциям устройств в системах возврата конденсата греющего пара внешних потребителей, конденсационных установок

паровых турбин, системы водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением, деаэраторов перегретой воды и т.п.;

-по вопросу выявления факторов, влияющих на коррозию материалов технологических систем ТЭЦ;

-по методам моделирования вихревых и закрученных течений, в том числе имитационного характера

позволил установить направление повышения эффективности деаэрации теплоносителя в технологических системах ТЭС за счет применения кавитационно-струйного деаэратора с совершенствованием схем его включения и режимов работы.

Во **второй главе** представлена разработка имитационной модели активной зоны кавитационно-струйного деаэратора в среде Flow Vision для двух случаев: в отсутствии и при наличии отсоса паровоздушной смеси. Для разработанной упрощенной геометрической модели рабочей зоны указанного деаэратора моделировалось двухфазное потенциальное течение двух не перемешивающихся несжимаемых жидкостей с расчетом избыточных статических и полных давлений вдоль радиуса в горизонтальном (по оси X) и вертикальном (по оси Y) направлениях, а также оценкой соответствующих усредненных значений давлений в потоке воды в данном сечении. Выявлено, что отсос пара способствует утолщению слоя жидкости по всей длине активной зоны деаэратора на величину от 13 до 20 %, здесь верхний предел указан для сечений вблизи выходного обтекателя в направлении течения воды. Показано, что статическое давление в потоке воды в активной зоне деаэратора практически полностью определяется сопротивлением тракта отсоса пара.

В **третьей главе** выполнены обобщение экспериментальных данных о деаэрации воды за чет начального эффекта и разработка описания процесса деаэрации воды в кавитационно-струйном деаэраторе. В частности, предложена первоначальная критериальная форма оценки эффекта деаэрации, для которой по опытным данным из открытых источников других исследователей выполнена проверка адекватности с последующим введением эмпирической поправки. Например, автором выявлено, что известная модель И.И. Оликера для вакуумных деаэраторов классической конструкции практически вдвое занижает эффект деаэрации относительно экспериментальных значений и потому не применима при рассматриваемых условиях, а модель (1), при качественно верном прогнозировании экспериментальных данных количественно дает завышенную оценку эффекта деаэрации. Заметим, что указанное введение эмпирической поправки приводит к дополнительным двум критериальным формам представления эффекта деаэрации, при этом во всех трех случаях предложенных способов расчета автором выявлены совпадающие границы их применимости для следующих параметров процесса: изменение температуры для начального перегрева воды перед деаэратором $\Delta t_{\text{вх}} = t_{\text{вх}} - t_s = (0,3-9,7) \text{ } ^\circ\text{C}$; давления в деаэрационном элементе

$p_d=(0,26-0,88) \cdot 10^5$ Па; относительной гидравлической нагрузки $g = G/G_H=(0,3-1,0)$; для массовой концентрации растворенного кислорода в воде на входе в данный элемент $C_0=(330-6405)$ мкг/дм³. Сопоставления адекватности указанных форм представления эффекта деаэрации проведены по нескольким критериям: Фишера, множественному корреляционному отношению и среднеквадратичному отклонению.

Четвертая глава посвящена предложенным техническим решениям с выдачей соответствующих рекомендаций по повышению эффективности деаэрации теплоносителя в технологических системах ТЭС за счет включения в них кавитационно-струйного деаэратора, в частности, в системах возврата конденсата пара внешних потребителей; конденсационных установках паровых турбин; системах водяного охлаждения обмотки статора турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением. Например, для систем возврата конденсата внешних потребителей на основе выполненных исследований предложен способ оценки требуемой производительности и количества устанавливаемых деаэраторов, кратности рециркуляции воды через них, необходимой в каждом режиме, в том числе применительно к условиям Ивановской ТЭЦ-1 с практическими рекомендациями для реальных условий эксплуатации. При этом расчетная скорость коррозии трубопровода возвратного конденсата при реализации мероприятия уменьшится в среднем на 43%, а при разных режимах в пределах (31-49)%.

Заметим, что первая глава диссертации заканчивается постановкой задач исследования, остальные – соответствующими выводами, в заключении представлены основные выводы и рекомендации.

В имеющихся двух приложениях размещены: экспериментальные данные, используемые в работе; два акта внедрения технических решений на предприятиях ЗАО «Управляющая компания объединенного петербургского энергостроительного консорциума» (г. Санкт-Петербург) и ЗАО «Родниковская энергетическая компания» (г. Родники Ивановской обл.) с соответствующим экономическим расчетом внедрения результатов; информация об использовании электронного учебного пособия «Атмосферные деаэрационные установки» в учебный процесс ИГЭУ.

Замечания по диссертации

1. Просьба пояснить особенности предложенной автором модели процесса деаэрации в аппаратах перегретой воды с позиции термодинамического подхода, анонсированного таким образом в тексте диссертации.
2. Применение пакета Flow Vision предполагает моделирование поля давлений в выделенном имитационном рабочем объеме аппарата при ус-

лови подачи пара в заданное сечение сосредоточенным образом, однако на практике данная подача имеет распределенный характер. На наш взгляд, требуется дополнительное объяснение возможных пределов погрешности выполняемых расчетов.

3. Представление потока пара в реальном деаэраторе в виде течения несжимаемой жидкости в имитационном рабочем объеме аппарата в рамках пакета Flow Vision также требует пояснений. При каких условиях правомерно данное приближение? Имеется ли подобный опыт у других исследователей?
4. Для оценки эффективности удаления эжектором паровой фазы, накапливающейся вследствие инерционных явлений в приосевой зоне канала при турбулентном режиме течения жидкости, может быть использован показатель степени ее закрутки, как характеристика интенсивности вихреобразования рабочей жидкости в активной зоне кавитационно-струйного деаэратора. Однако данный фактор, на наш взгляд, представлен в расчетном анализе работы недостаточно.
5. Для усиления практической значимости работы целесообразно было оформить соответствующую заявку на объект интеллектуальной собственности, например, на полезную модель, согласно заявленным автором как попыткам модернизации известных технических решений для отдельных технологических систем ТЭС, так и новым решениям в данной области, в частности, для системы возврата конденсата пара внешних потребителей.
6. В диссертации и автореферате отсутствуют списки условных обозначений, но в соответствующих текстах представлена их аккуратная расшифровка по мере введения.

Наличие указанных замечаний позволяет, тем не менее, характеризовать работу положительно.

Общая оценка диссертации

Диссертация Барочкина Ю.Е. соответствует паспорту научной специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты», выполнена на актуальную для энергетической отрасли тему. Все основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, следует признать достоверными и обоснованными. Диссертация обладает внутренним единством содержания, научной новизной и практической значимостью. Содержание автореферата полностью отражает основные положения диссертации. Результаты работы частично внедрены в промышленности. Основные положения диссертации в полной мере опубликованы в открытой печати (8 статей в рецензируемых журналах из списка рекомендованных ВАК, 1 статья - в журнале, индексируемом в международной базе SCOPUS) и апробированы на 9 научных и научно-практических конференциях; требования п. 13 «Положения о присуждении ученых степеней» в отношении публикации результатов диссертаций выполнены.

Заключение по диссертации

Направления и методы исследования диссертационной работы Барочкина Юрия Евгеньевича соответствуют паспорту научной специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты», а именно, формуле специальности: *«совершенствовани(е) действующих ... типов и конструкций ... вспомогательного оборудования тепловых электрических станций»*; *«...поиск приемов и методов оптимизации рабочих режимов оборудования»*; *«вопросы ... водных режимов»*, *«проблемы обеспечения надежности... и требуемого рабочего ресурса оборудования...»*, *«технико-экономические ... исследования»*; и областям исследования: п. 1 *«Разработка научных основ методов расчета, выбора и оптимизации параметров ... агрегатов, систем ...»*; п. 2 *«Исследование и математическое моделирование процессов, протекающих в агрегатах, системах ...»*; п. 4 *«Разработка конструкций ... вспомогательного оборудования и компьютерных технологий их проектирования ...»*; п. 6 *«Разработка вопросов эксплуатации систем и оборудования...»*.

Диссертация Барочкина Ю.Е. является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности деаэрации теплоносителя в технологических системах ТЭС за счет применения ка-

витационно-струйного деаэрата, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие энергетической отрасли. Оппонируемая работа **«Совершенствование технологических систем ТЭС с применением кавитационно-струйного деаэрата»** соответствует всем критериям, установленным требованиями п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а ее автор **Барочкин Юрий Евгеньевич** заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты».

Официальный оппонент,
заведующий кафедрой «Теоретическая механика
и сопротивление материалов»
федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения
высшего образования «Ярославский
государственный технический университет»,
доктор физико-математических наук,
профессор

Капранова
Анна Борисовна

«13» мая 2020 г.

Адрес: 150023, г. Ярославль, Московский проспект, д. 88, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», кор. А, ауд. А-220а.

<http://www.ystu.ru>

Телефон: +7(4852) 44-52-83,

e-mail: kapranovaab@ystu.ru

«Подпись доктора физико-математических наук, профессора Капрановой А.Б. заверяю»

И. о. ректора ФГБОУ ВО «Ярославский
государственный технический
университет», к.э.н.



Степанова
Елена Олеговна

«13» июня 2020 г.