

на правах рукописи



ЕГОРОВ Михаил Юрьевич

**РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В СЕПАРАТОРАХ-ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯХ ТУРБИН АЭС
НА ОСНОВЕ ИЗУЧЕНИЯ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Специальность: 01.04.14 «Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт – Петербург – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Федорович Евгений Данилович

Официальные оппоненты: Хоменок Леонид Арсеньевич,
доктор технических наук, профессор,
Научно-производственное объединение по
исследованию и проектированию
энергетического оборудования
им. И.И. Ползунова, Санкт-Петербург,
заместитель генерального директора по
научной работе – заведующий отделением
турбинных установок

Пейч Николай Николаевич,
кандидат технических наук, доцент, Санкт-
Петербургский государственный морской
технический университет, профессор
кафедры энергетики

Ведущее предприятие: ОАО «Силовые машины», Санкт-
Петербург

Защита состоится «02» июня 2015 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29, Главное здание, ауд. 118.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» <http://www.spbstu.ru/science/defences.html>

Автореферат разослан «__» _____ 2015 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.229.06



Талалов Виктор Алексеевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

Развитие атомной энергетики стало основой увеличения энергетического потенциала многих стран мира. В ближайшие десятилетия намечено значительное развитие атомной энергетики и в РФ. Всё большее значение приобретает повышение эффективности и надёжности работы оборудования, для чего важно использование накопленного опыта разработки и эксплуатации существующего оборудования.

В турбоустановках насыщенного пара на выходе ЦВД пар имеет влажность $y \sim (10 \dots 15) \%$. Под влиянием влажности пара снижается экономичность и надёжность ТГ: лопатки последних ступеней ЦНД под воздействием влаги подвергаются эрозии и могут преждевременно выйти из строя. В ТГ АЭС сочетают внутритурбинную сепарацию влаги с сепарацией и промежуточным перегревом отборным паром из ЦВД и острым паром из основного паропровода перед турбоустановкой в специальных аппаратах СПП, рисунок 1.

Технико-экономические показатели систем ПСПП и турбоустановок в целом зависят от эффективности и надёжности СПП. Масса и занимаемый ими объём значительны. С ростом единичной мощности энергоблоков АЭС масса и габариты СПП увеличивались. Важность проблемы повышения надёжности и эффективности СПП и, в частности, повышения эффективности теплогидравлических процессов в них также возрастала.

Основным объектом исследования являются аппараты типа СПП-500-1, разные модификации которых установлены на всех действующих АЭС с реакторами РБМК-1000. Первоначально на первом энергоблоке ЛАЭС эксплуатировались в течение длительного периода аппараты СПП-500, разработанные ЦКТИ и изготовленные ЗиО. Затем на смену им были установлены СПП-500-1, разработанные и изготовленные ЗиО.

Одним из основных требований, предъявляемых к СПП, является эффективная и надёжная работа сепарационных устройств на всех режимах работы аппаратов. Признаки повышенного уровня влажности пара за сепарационными блоками наблюдались с первых лет эксплуатации СПП-500-1. Они связаны с особенностями конструкции сепарационной части. Проведенные ранее исследования по определению влажности нагреваемого пара в СПП-500-1 показали наличие крупнодисперсной влаги и даже струйного ее стекания с дырчатых листов сепарационных блоков. Подобные эффекты наблюдались на стороне СПП, противоположной входному ресиверу, и начинались уже при работе ТГ на мощности 300 МВт, с ростом мощности постепенно усиливаясь.

В целях повышения эффективности работы сепарационной части СПП была проведена их модернизация, основанная на замене отечественных жалюзийных сепарационных пакетов на жалюзийные пакеты типа «Powervane» фирмы «Балке-Дюрр», на изменении схемы движения пара во входной камере, на изменении расположения сепарационных пакетов и системы коллекторов, и как следствие, возникла необходимость в проведении испытаний модернизированных аппаратов с последующим анализом получаемых в

промышленных условиях новых экспериментальных данных.

Аппарат СПП-500 был заменен на другую конструкцию после определённых повреждений, не связанных с выполнением этим аппаратом своих основных функций (сепарации и перегрева), это решение было обусловлено, главным образом, стремлением к унификации аппаратов, сопровождающейся совершенствованием технологии изготовления. Конструкция СПП-500 является прогрессивной в части организации рабочего процесса и может применяться при создании новых аппаратов. Аппарат СПП-500 рассчитывался по старым методикам и в отсутствие опыта эксплуатации систем ПСПП. При их проектировании потребуются усовершенствованные методики, в том числе и методика расчёта теплопередачи в перегревателе змеевикового типа, последняя может быть использована для расчётов и других теплообменных аппаратов с поверхностью нагрева спирального типа.

В процессе дальнейшей модернизации и при создании новых СПП необходимо также использовать результаты экспериментальных и расчётных исследований (включая исследования, в которых участвовал автор), выполненных за последние годы и учитывающих длительный опыт эксплуатации этих аппаратов на отечественных и зарубежных АЭС.

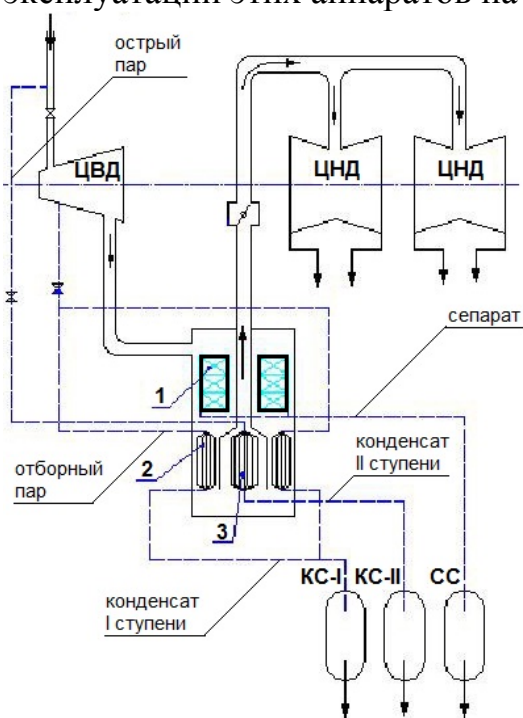


Рисунок 1. Принципиальная схема системы ПСПП с СПП-500-1: 1—сепаратор, 2, 3—перегреватель I, II ступени.

Конструктивные принципы, реализованные в СПП-500, были заложены К.А.Блиновым, Д.И.Гремилковым в 1960^е гг. в отсутствие опыта эксплуатации аппаратов СПП и исследований теплообмена змеевикового типа компоновки.

В последние годы повышению надёжности СПП уделяли внимание К.Н.Денисов, А.М.Маринич. В значительной части эти исследования охватывают разработку новых конструкций СПП для АЭС с водо-водяными реакторами.

Степень разработанности темы исследования.

Проблемам повышения эффективности теплогидравлических процессов в СПП турбин АЭС посвящены труды М.Я.Беленького, М.А.Готовского, А.В.Судакова, Е.Д.Федоровича, Б.С.Фокина.

Вклад в изучение сепарации влаги из пара внесли исследования Ю.Л.Сорокина; М.Каатц (Германия), Н.Нoffmann (Германия); работы В.А.Барилевича содержат фундаментальные основы термогазодинамики двухфазных потоков. В работах К.М.Арефьева отражены теоретические и расчётные особенности конденсации из парогазовой смеси.

Промышленные испытания систем ПСПП проводились ранее Л.Н.Артемовым и В.Ф.Десятуном; В.А.Шварцем (Украина) и И.Ш.Бушлером (Украина).

Цель работы — проведение и получение результатов промышленных испытаний аппаратов СПП-500-1 после их модернизации; уточнение существующих методик теплогидравлического расчёта СПП на основе получения собственных расчётных данных и изучения принципов организации и способов повышения эффективности рабочего процесса в СПП, анализ опыта эксплуатации СПП на отечественных и зарубежных АЭС.

Задачи исследования:

1. Подготовка и непосредственное участие в промышленных испытаниях СПП-500-1 на ЛАЭС и СМАЭС после модернизации их сепарационной части, анализ результатов испытаний.

2. Определение влажности на выходе из сепарационных блоков СПП в испытаниях на ЛАЭС и СМАЭС.

3. Определение температуры нагреваемого пара после первой ступени перегревателя СПП на ЛАЭС.

4. Расчёт теплопередачи в перегревателе змеевикового типа.

Научная новизна.

1. Получены результаты анализа (по литературным данным) отечественного и зарубежного опыта проектирования, эксплуатации и модернизации систем ПСПП за период более 50 лет.

2. Получены новые экспериментальные данные по распределению по периметру модернизированных СПП-500-1 влажности отсепарированного пара на выходе из сепарационных блоков для условий работы ТГ № 7 четвертого блока ЛАЭС, ТГ № 1, № 2 первого блока СМАЭС.

3. Получены экспериментальные данные по распределению температуры нагреваемого пара в поворотной камере после первой ступени перегрева в модернизированных СПП-500-1 ТГ № 7 четвертого блока ЛАЭС.

4. Получены экспериментальные данные по расходу сепарата нагреваемого пара на ТГ № 7, № 8 четвертого блока ЛАЭС, на ТГ № 1, № 2 первого блока СМАЭС.

5. Получены экспериментальные данные по расходу сепарата на плёночных предсепараторах СПП-71, СПП-72, СПП-73, СПП-74 ТГ № 7 четвертого блока ЛАЭС.

6. Получены экспериментальные данные по расходу конденсата греющего пара первой ступени на ТГ № 7 четвертого блока ЛАЭС, на ТГ № 1, № 2 первого блока СМАЭС.

7. Проведено сравнение расчётных рекомендаций различных авторов по определению интенсивности теплоотдачи гладкотрубных поперечно обтекаемых пучков шахматной и коридорной компоновок, на основе которого сформулирована усовершенствованная методика расчёта интенсивности теплоотдачи перегревательного пучка змеевиковых труб типа использованного в СПП-500.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Полученные экспериментальные данные могут использоваться для оценки теплогидравлических параметров и режимов работы оборудования

турбоустановок АЭС.

2. Впервые экспериментально подтверждена зависимость температуры нагреваемого пара в поворотной камере перегревателей СПП-500-1 от длины линий подвода греющего пара первой ступени перегрева.

3. Высокая эффективность осушения потока пара в сепарационной части модернизированных СПП-500-1 и успех модернизации в целом подтверждены данными промышленных испытаний, свидетельствующими о снижении влажности пара на выходе из сепарационных блоков и улучшении её распределения по периметру СПП, повышении температуры перегрева.

4. Уточнена методика теплогидравлического расчёта СПП турбоустановок К-500-65/3000 в направлении расчёта интенсивности теплоотдачи пучка змеевиковых труб.

5. Уточнённая методика рекомендуется к использованию при анализе рабочего процесса как в существующих, модернизируемых, так и во вновь создаваемых, более совершенных СПП.

Методология и методы исследования.

При выполнении диссертационной работы использовались как экспериментальные, так и расчётные методы исследования.

Методология работы в части совершенствования расчетных методик основана на исследовании имеющихся литературных источников с анализом возможности их применения для решения рассмотренных в работе проблем и с привлечением экспериментальных и эксплуатационных данных.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. Экспериментальные данные по распределению по периметру модернизированных СПП-500-1 влажности отсепарированного пара на выходе из сепарационных блоков.

2. Данные измерений распределения температуры нагреваемого пара после первой ступени перегрева в модернизированных СПП-500-1.

3. Данные по мониторингу расхода сепарата на плёночных предсепараторах, сепарата нагреваемого пара на турбоустановках.

4. Данные мониторинга расхода конденсата греющего пара первой ступени на турбоустановках.

5. Предложения по уточнению методики теплогидравлического расчёта СПП со змеевиком плотным гладкотрубным перегревательным пучком переходного от шахматного к коридорному типа компоновки, поперечно обтекаемым перегреваемым паром с учётом изменения интенсивности теплоотдачи и площади теплопередающей поверхности в рядах вглубь пучка, а также при использовании расчётных зависимостей, полученных в исследованиях тесных коридорных и шахматных пучков, наиболее приближенных к проектным параметрам перегревателей СПП.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность изложенных результатов базируется на проведении промышленных экспериментов на ЛАЭС и СмАЭС с использованием апробированных измерительных приборов и экспериментальных методик; на

привлечении согласующихся между собой эксплуатационных и экспериментальных данных, а также на широком использовании и сравнении данных различных исследователей при решении поставленных в работе расчётных задач.

Основные материалы диссертации доложены и положительно оценены на 5^{-ой}, 6^{-ой} Балтийских международных конференциях по теплообмену (СПб, 2007; Тампере, Финляндия, 2011); на 14^{-ом} Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, Белоруссия, 2012); на 6^{-ой} российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2014); на 9^{-ой}, 10^{-ой} международных молодёжных научных конференциях «Полярное сияние» (СПб, 2006; 2007); на международной, всероссийских межвузовских научно-технических конференциях «XXXIV–XXXVIII Неделя науки» (СПб, 2005–2009); на 1^{-ом}, 2^{-ом} и 3^{-ем} Санкт-Петербургских конгрессах «Профессиональное образование, наука, инновации в XXI веке» (2007–2009); на международном Политехническом симпозиуме «Молодые ученые — промышленности Северо-Западного региона» (СПб, 2010); на XIV, XV международных научно-методических конференциях «Высокие интеллектуальные технологии и инновации в образовании и науке» (СПб, 2007; 2008); на X, XI всероссийских конференциях «Фундаментальные исследования в технических университетах» (СПб, 2006; 2007); на IV, VI–VIII всероссийских межвузовских конференциях молодых учёных (СПб, 2007; 2009; 2010; 2011); на молодёжной научной конференции «Студенты и молодые учёные — инновационной России» (СПб, 2013); на научно-технической конференции молодых учёных и специалистов атомной отрасли «Актуальные вопросы проектирования и строительства АЭС» (СПб, 2010); на кафедре компьютерных технологий и эксперимента в теплофизике СПбГПУ (2005–2008); на кафедре гидроаэродинамики СПбГПУ (2014); на всероссийской конференции «XXXI Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2014); на семинаре отдела исследования и проектирования оборудования АЭС НПО ЦКТИ (СПб, 2011); на секции атомной энергетики научно-технического совета НПО ЦКТИ (СПб, 2011).

Доклады соискателя «Теплогидравлические процессы в системах ПСПП влажнопаровых турбин АЭС» и «Модернизация СПП и анализ результатов испытаний СПП-500-1 на IV блоке ЛАЭС» на VII и VIII всероссийских межвузовских конференциях молодых учёных (СПб, 2010, 2011) признаны лучшими докладами секций и отмечены дипломами.

В диссертации представлены результаты расчётных разработок по анализу теплопередачи в перегревателях СПП, выполненных автором самостоятельно. Экспериментальные исследования проведены совместно со специалистами НПО ЦКТИ (к.т.н. М.Я.Беленький, М.А.Блинов, К.В.Соколов), ЛАЭС (Г.А.Кайсин) и СмАЭС (В.И.Куприн, В.А.Соловьёв) с участием автора в подготовке оборудования, проведении экспериментов, обработке данных, анализе результатов, формулировке выводов. Неоценимую методическую помощь автору оказал д.т.н. М.А.Готовский. Автор выражает благодарность д.т.н. А.В.Судакову и к.т.н. В.А.Талалову за ценные рекомендации на всех

стадиях исследования.

По материалам диссертации опубликовано 38 работ, из них 4 работы в изданиях, рекомендованных ВАК.

Диссертация состоит из четырёх глав и списка использованных источников. Текст изложен на 169 страницах машинописного текста. Диссертация содержит 168 рисунков и 24 таблицы, библиографический список, включающий 126 наименований, и три приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы и определена цель исследования.

В главе 1 составлен обзор и выполнен анализ отечественного опыта разработки и эксплуатации систем ПСПП на АЭС, начиная с разработок первых СПП и отдельных сепараторов систем ПСПП, охватывающий период с 1960^{-х} годов по настоящее время.

Основное внимание уделено теплогидравлическим особенностям рабочего процесса в СПП-500-1. Показано их влияние на надёжность и эффективность СПП.

В главе 2 представлены результаты промышленных испытаний модернизированных СПП-500-1 ТГ № 7, № 8 четвертого блока ЛАЭС (2010 г.) и модернизированных СПП-500-1 ТГ № 1, № 2 первого блока СМАЭС (2011 г.).

В параграфе 2.1 описаны особенности модернизации системы ПСПП. Представлена схема модернизированной сепарационной части. Показано, какими конструктивными решениями обеспечивается улучшение условий работы жалюзийных пакетов.

Параграф 2.2 посвящён анализу результатов определения влажности в сепарационной части четырёх испытанных СПП-500-1 на ЛАЭС.

Описана система определения влажности нагреваемого пара на выходе из сепарационных блоков методом дросселирования влажного пара из двухфазной области в область перегретого пара. Приведена схема расположения шести отборов проб из парового пространства на выходе из сепарационных блоков. Каждый отбор снабжен тремя трубками (на расстоянии 150 мм друг от друга) в целях осреднения значений влажности пара после сепарационного блока.

Получены данные по распределению влажности отсепарированного пара по периметру СПП-71, СПП-72, СПП-73, СПП-74, рисунок 2.

Проведено сопоставление результатов двух серий испытаний, рисунок 3, имеет место хорошее соответствие результатов первой и второй серии (интервал – 25 дней).

Анализ полученных результатов показал, что распределение влаги по периметру аппарата во всех четырех СПП носит равномерный характер, величина влажности находится в интервале (0,20...0,85) %. Среднее значение по всем четырем СПП составило $y \sim 0,5$ %, что близко к проектному значению. Определение влажности у блока С с помощью двух отборов, расположенных на различной высоте, показало равномерное распределение влажности по высоте парового пространства сепарационной части. Отбор, расположенный вдоль

стенки опускного канала, не показал повышенной влажности, что свидетельствует об отсутствии стекающей по стенке жидкости. Не обнаружено влияния на величину влажности конструктивных особенностей сепарационных блоков.

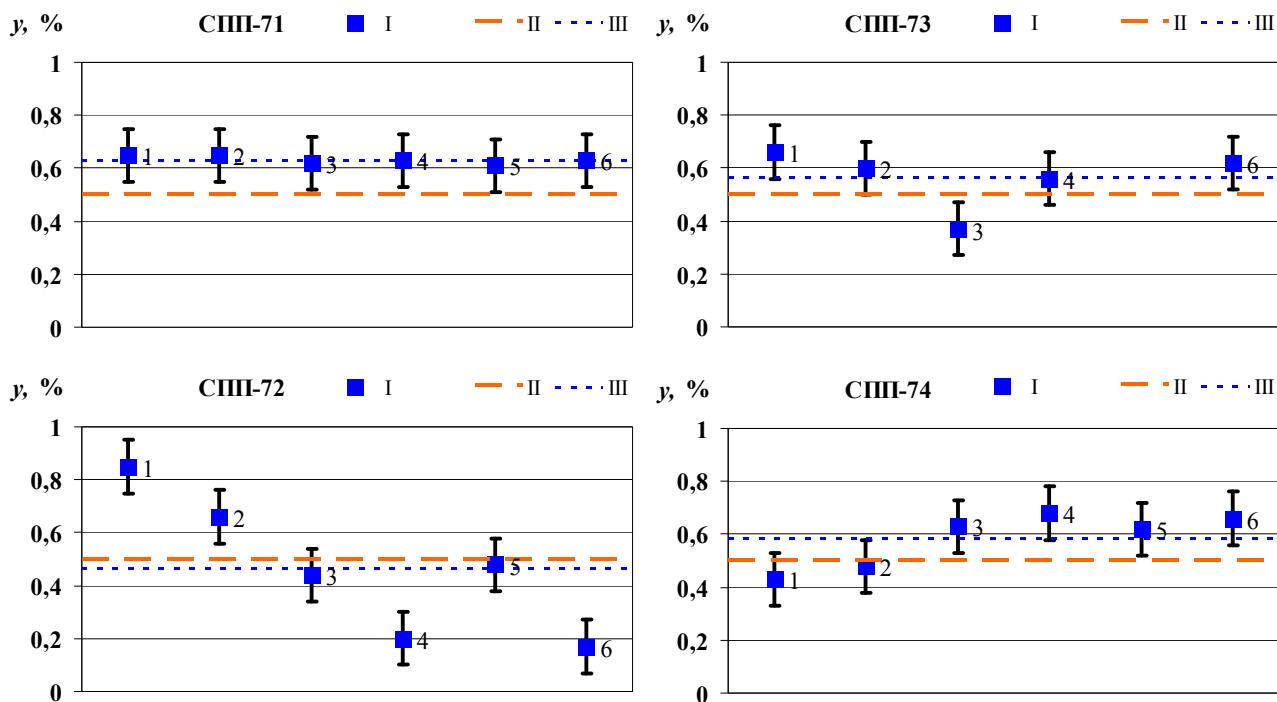


Рисунок 2. Результаты определения влажности отсепарированного пара y для СПП-71, СПП-72, СПП-73 и СПП-74: I—фактические значения, II—проектное значение, III—среднее по всем точкам отбора фактическое значение, 1—отбор у стенки канала, 2, 3, 4, 5, 6—отборы у сепарационных блоков «E», «D», «B», «C», «C».

Параграф 2.3 посвящён анализу результатов измерения температуры нагреваемого пара в поворотной камере (после первой ступени перегревательной части) испытанных СПП-500-1 на ЛАЭС.

Приведены схемы установки термометров сопротивления.

Получены значения температуры нагреваемого пара в поворотной камере при нормативной влажности отсепарированного пара (рисунок 4). Значения

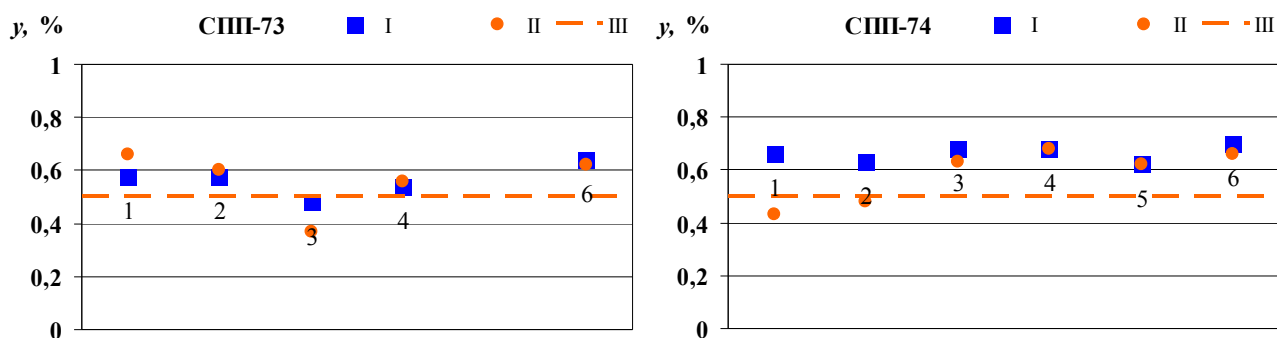


Рисунок 3. Сопоставление результатов определения влажности отсепарированного пара y , полученных в двух сериях испытаний для СПП-73, СПП-74: I—первая серия, май 2010 г., II—вторая серия, июнь 2010 г., III—проектное значение, 1—отбор у стенки канала, 2...6—отборы у сепарационных блоков «E», «D», «B», «C», «C».

температуры находятся в диапазоне (175...195) °С. Распределение температуры имеет два максимума. Впервые проиллюстрирована связь неравномерности

распределения температуры с различной длиной подводных линий греющего пара первой ступени перегрева: установлено, что для групп перегревателей модулей с более длинными линиями подвода расход греющего пара меньше, чем для коротких, и часть поверхности выключена из теплообмена вследствие падения температурного напора между нагреваемым и греющим паром до нуля. В немодернизированной конструкции СПП это не удавалось обнаружить ввиду значительного количества влаги, остававшейся в паре после сепарационной части.

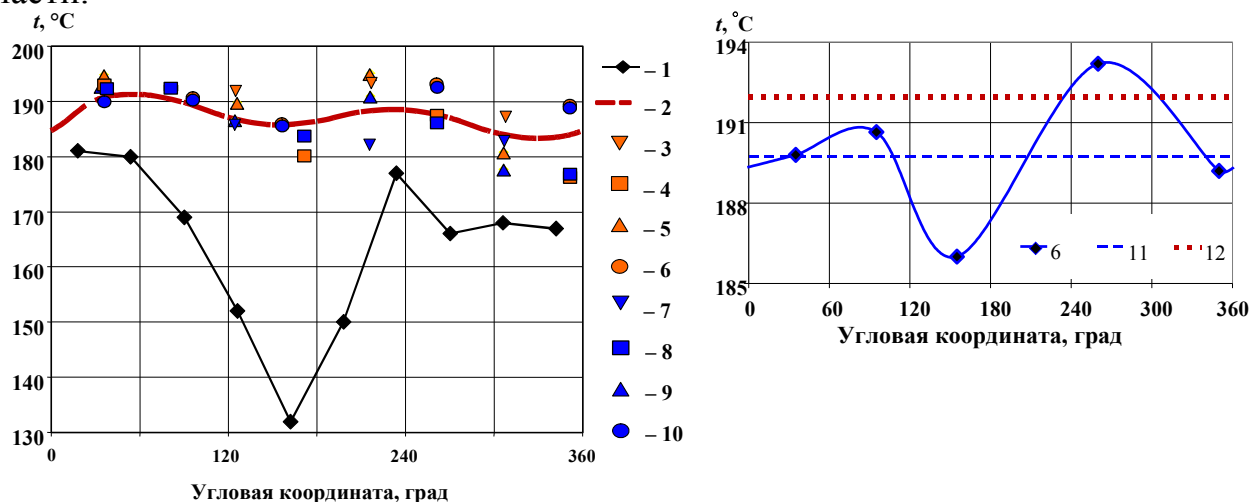


Рисунок 4. Распределение температуры нагреваемого пара в поворотной камере: 1—данные работы¹ для СПП до модернизации; данные настоящей работы: 2—осредняющая линия по СПП-71...74, 3—СПП-71 – I, 4—СПП-72 – I, 5—СПП-73 – I, 6—СПП-74 – I, 7—СПП-71 – II, 8—СПП-72 – II, 9—СПП-73 – II, 10—СПП-74 – II, I, II—первая и вторая серии испытаний, 11—среднее значение СПП-74, 12—проектное среднее значение температуры.

Параграф 2.4 содержит результаты измерения расходов сепарата плёночных предсепараторов, установленных на ЛАЭС перед СПП-71, СПП-72, СПП-73, СПП-74 для отделения влаги со стенок подводного нагреваемого пар трубопровода; расходов сепарата ТГ № 7, № 8 ЛАЭС (через сепаратосборники) и расходов конденсата греющего пара первой ступени ТГ № 7 ЛАЭС.

В параграфе 2.5 приведены литературные данные о параметрах работы СПП на СМАЭС до модернизации: повышенная по сравнению с проектной влажность пара на выходе из сепарационных устройств, пониженные температуры перегрева пара и после первой, и после второй ступени перегревателей. Показано, что значения влажностей коррелируют с уровнем перегрева.

Параграф 2.6 посвящён анализу результатов определения влажности в сепарационной части двух модернизированных СПП-500-1 СМАЭС.

Получены данные по распределению по периметру СПП-14 и СПП-24 влажности отсепарированного пара (рисунок 5).

Анализ полученных данных показал, что распределение влаги по периметру аппарата в обоих СПП носит равномерный характер. Величина

¹Шишкин А.А., Федорович Е.Д. Опыт эксплуатации промежуточных СПП турбин ЛАЭС // Труды ЦКТИ (Повышение надежности энергетического оборудования атомных станций). 1981. Вып. 189. С. 3–9.

влажности находится в интервале (0,5...0,7) %.

По значениям влажности у сепарационного блока *C* на расстоянии точек отбора 670 мм друг от друга по высоте (точки 5, 6 на рисунке 5) получено равномерное распределение влажности по высоте парового пространства. Признаков жидкости, стекающей по стенке опускного канала, не обнаружено. Не обнаружено влияния на величину влажности конструктивных особенностей сепарационных блоков. По результатам испытаний среднее значение влажности по обоим СПП составило $y \sim 0,6$ % и близко к проектному.

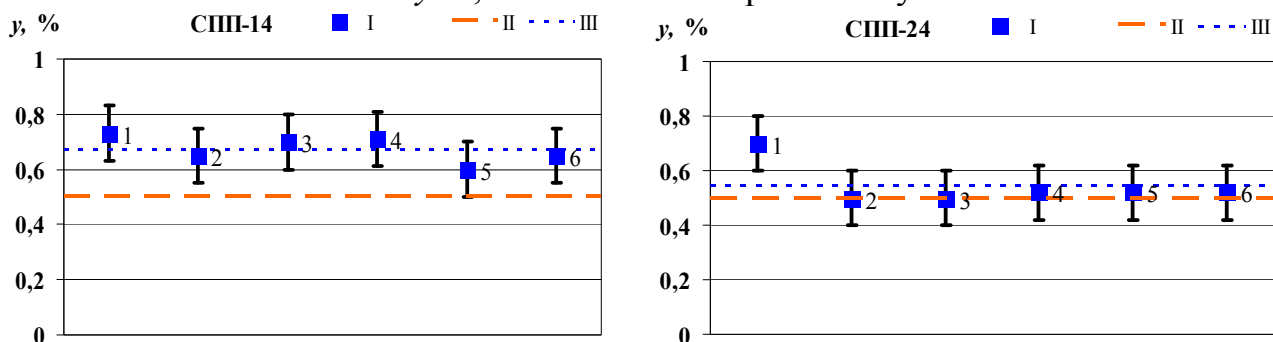


Рисунок 5. Результаты определения влажности отсепарированного пара y для СПП-14 и СПП-24: I—фактические значения, II—проектное значение, III—среднее по всем точкам отбора фактическое значение: 1—отбор у стенки канала, 2...6—отборы у сепарационных блоков «E», «D», «B», «C», «C».

Параграф 2.7 содержит результаты измерения расхода сепарата и конденсата греющего пара первой ступени ТГ № 1, № 2 СМАЭС.

Расход сепарата через общий сепаратосборник ТГ № 1 составил $250 \text{ м}^3/\text{ч}$, через общий сепаратосборник ТГ № 2 — $270 \text{ м}^3/\text{ч}$. Расход конденсата греющего пара первой ступени ТГ № 1 составил $120 \text{ м}^3/\text{ч}$, ТГ № 2 — $140 \text{ м}^3/\text{ч}$.

В параграфе 2.8 проведено сопоставление результатов определения влажности и расхода на ЛАЭС и на СМАЭС.

Установлено, что распределения влаги по периметру аппаратов, по высоте парового пространства на выходе из сепарационных блоков имеют равномерный характер как на СМАЭС, так и на ЛАЭС.

Среднее значение влажности после сепарационных блоков на СМАЭС несколько [на 0,1 % (абс.)] больше, чем на ЛАЭС. В отдельных аппаратах как на СМАЭС (СПП-24), так и на ЛАЭС (СПП-72) имеет место незначительное повышение концентрации влаги [на 0,2 % (абс.) и на 0,4 % (абс.) бóльшая, чем в среднем по соответствующему аппарату] на стенке опускного канала.

Полученные на ТГ № 1, № 2 СМАЭС значения расходов сепарата, конденсата греющего пара первой ступени соответствуют полученным на ТГ № 7, № 8 ЛАЭС.

Глава 3 посвящена расчётному анализу теплопередачи в пароперегревателях СПП-500, первоначально эксплуатируемых на ЛАЭС.

В параграфе 3.1 описан предложенный автором метод расчёта теплоотдачи перспективного для новых проектов перегревательного пучка змеевиковых труб типа использованного в перегревателе СПП-500.

Предложена модель спирального змеевика в виде набора концентрических трубных колец (рисунок 6). В модели в каждом радиальном сечении пучка

сохранено расстояние между осями отдельных трубок пучка по глубине, расстояния между осями отдельных трубок пучка по высоте пучка неизменны, то есть сохранены относительные поперечные $\sigma_1 = s_1/d$ (по глубине) и продольные $\sigma_2 = s_2/d$ (по высоте) шаги. Расчёт теплоотдачи пучка проводится методом осреднения значений, полученных для отдельных рядов (колец) с учётом вклада каждого кольца в общую поверхность теплопередачи.

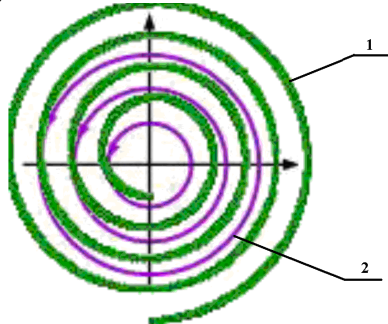


Рисунок 6. Схема фактического змеевикового пучка (1) и предложенной расчётной модели (2).

В параграфе 3.2 приведены исходные данные и допущения для уточнённого расчёта змеевикового перегревателя на параметры СПП-500.

В параграфе 3.3 проведён теплогидравлический расчёт пароперегревателя СПП-500 по предложенному в параграфе 3.1 методу.

Представлена методика расчёта теплоотдачи к перегреваемому пару при обтекании змеевикового пучка типа СПП-500.

Выполнен анализ литературных данных по теплоотдаче гладкотрубных поперечно обтекаемых пучков в широком диапазоне параметров: $Re=(1...2 \cdot 10^6)$, $Pr=(0,7...10^4)$, $\sigma_1=(1,008...3,0)$, $\sigma_2=(0,6...3,9)$. Проведены расчёты по зависимостям различных авторов, сопоставлены результаты расчётов. Имеет место дефицит опытных данных и расчётных зависимостей теплоотдачи пучков спиральных змеевиков.

Установлено, что для условий теплообмена в пароперегревателях типа использованного в аппарате СПП-500, набранном из спиральных змеевиков с геометрией $\sigma_1 = 1,14$, $\sigma_2 = 1,11$, и эксплуатируемом с параметрами номинального режима $Re_I=4,9 \cdot 10^4$, $Pr_I=1,02$ (I ступень); $Re_{II}=5,7 \cdot 10^4$, $Pr_{II}=0,97$ (II ступень), в целях повышения точности теплового расчёта необходим тщательный отбор расчётных зависимостей, исходя из максимально возможного соответствия условий экспериментов, результаты которых обобщены этими зависимостями, проектным параметрам исследуемых перегревателей.

Поскольку анализируемый змеевиковый пучок представляет собой пучок с периодически меняющейся компоновкой от коридорной к шахматной, он рассмотрен автором отдельно в коридорном и отдельно в шахматном приближениях. Истинное значение теплоотдачи исследуемого пучка предложено считать как находящееся на интервале между значениями, полученными в этих приближениях.

Для коридорного приближения выбрана зависимость (1)

$$Nu = 0,308 Re^{0,63} Pr^{0,36}, \quad (1)$$

полученная авторами работы² при обобщении данных для пучков $\sigma_1 = (1,2...1,4)$, $\sigma_2 = (1,09...1,12)$, наиболее приближенных (по геометрии) к

²Жукаускас А., Улинскас Р. Теплоотдача поперечно обтекаемых пучков труб. Вильнюс: Мокслас, 1986. 204 с.

анализируемому пучку СПП-500 $\sigma_1 = 1,14$, $\sigma_2 = 1,11$.

Опытные данные для шахматных пучков подобных геометрий немногочисленны. Авторы работ³ обобщают собственные опытные данные для правильных ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma$) шахматных пучков с относительными шагами $\sigma = 1,05$ и $\sigma = 1,1$ и данные других авторов для шахматных пучков правильной геометрии с малым относительным шагом $\sigma = 1,027 \dots 1,19$ зависимостью (2) для средней теплоотдачи поперечно обтекаемых правильных шахматных пучков:

$$Nu_f = 0,36 \{ 1 + 0,25 \exp [-100 (\sigma - 1,18)^2] Re_f^{0,6} Pr_f^{0,36} \}, \quad \sigma > 1,05. \quad (2)$$

Расчётами показано, что значения интенсивности теплоотдачи нагреваемого пара к плотному перегревателю пучку при его рассмотрении в коридорном (с использованием зависимости А.Жукаускаса, Р.Улинскаса и др.) и шахматном (с использованием зависимости М.Я.Беленького, М.А.Готовского и др.) приближениях отличаются незначительно, различие между безразмерными коэффициентами теплоотдачи и для I ступени, и для II ступени перегрева не превышает 1 %:

- для I ступени $Nu_{нп\text{ корид I}} = 283$ по зависимости (1), $Nu_{нп\text{ шахм I}} = 281$ по зависимости (2),

- для II ступени $Nu_{нп\text{ корид II}} = 303$ по зависимости (1), $Nu_{нп\text{ шахм II}} = 304$ по зависимости (2).

Для дальнейших расчётов принято $Nu_{нп\text{ I}} = 281$, $Nu_{нп\text{ II}} = 303$.

Результаты расчётов по зависимостям, отобранным автором, свидетельствуют о возможностях компоновки змеевикового типа, о наличии резерва (по сравнению с проектным) поверхности нагрева на уровне 30 %.

Для дальнейшего исследования теплопередачи в пароперегревателях подобного типа целесообразно проведение экспериментов на паре натуральных параметров с пучками натурной геометрии и трубами из натуральных материалов.

В главе 4 проанализированы пути повышения эффективности теплогидравлических процессов в системах ПСПП и их реализация в современных проектах СПП.

В параграфе 4.1 сформулированы задачи совершенствования методов расчёта и проектирования современных СПП с учётом пятидесятилетнего отечественного и зарубежного опыта разработки и эксплуатации СПП, а также требования к организации рабочего процесса (по сепарации, перегреву, гидравлике по стороне перегреваемого пара; устойчивости работы пароконденсирующего тракта греющего пара; надёжности эвакуации сепарата и конденсата греющего пара).

В параграфе 4.2 проанализированы причины и последствия работы систем

³Беленький М.Я., Готовский М.А., Фокин Б.С. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик поперечно обтекаемых суперплотных шахматных пучков труб // Теплоэнергетика. 2000. № 10. С. 44–48.

Готовский М.А., Беленький М.Я., Маринич А.М. и др. Теплогидравлические характеристики суперплотных поперечно обтекаемых трубных пучков // Труды ЦКТИ. 2002. Вып. 282. С. 186–202.

ПСПП в режимах, снижающих их эффективность и надёжность.

Указаны особенности рабочего процесса, способствующие возникновению неблагоприятных режимов работы, проиллюстрированы последствия таких режимов.

Обсуждаются варианты отечественных и зарубежных предсепараторов, применение жалюзийных элементов с влагозахватывающими ловушками.

Рассмотрена организация равномерного распределения потоков влажного нагреваемого пара в сепарационной части СПП, организация устойчивого отвода сепарата из СПП.

Нестабильность расхода сепарата наблюдалась многими исследователями, и, в частности, зарегистрирована автором на ЛАЭС и СМАЭС.

На примере СПП-500-1 рассматриваются теплогидравлические процессы, происходящие при попадании сепарата на поверхности перегревателей трубок и его неустойчивом кипении, приводящие к температурным пульсациям и термическим напряжениям, ограничивающим срок службы перегревателя.

Сформулированы рекомендации для исключения колебаний температур в каналах отвода конденсата греющего пара из пароперегревателя.

Проанализированы теплогидравлические причины термоциклических повреждений труб выхода конденсата греющего пара из перегревателя СПП. Дан обзор и рекомендации автора по выбору параметров системы слива и сбора конденсата, обеспечивающих устойчивое его течение без переохлаждения; обсуждается устранение данного явления в СПП.

В параграфе 4.3 анализируются отечественные и зарубежные проекты новых СПП для энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 (1200). Приведены концепции новых конструкций СПП ЗиО, ЦКТИ-Балтийский завод, Балке-Дюрр. Сравниваются конструкции перегревателя с продольно оребренными трубками и поперечно обтекаемыми низкоорбренными трубками.

Параграф 4.4 посвящён интенсифицированным поверхностям теплообмена СПП.

На основе зарубежного опыта рассматривается возможность применения в перегревателях СПП поперечно обтекаемых пучков из низкоробристых труб.

Анализируется возможность использования в пароперегревателях СПП поверхностей теплообмена с искусственной шероховатостью — олунированных труб. При приемлемой величине интенсификации теплообмена они обеспечивают опережающий рост теплоотдачи по сравнению с ростом гидросопротивления.

Показаны преимущества олунированных труб над оребренными по их теплогидравлическим характеристикам.

В приложении 1 помещён обзор и выполнен анализ зарубежного опыта эксплуатации СПП.

Представлен опыт эксплуатации систем ПСПП германских («Еуроформ», «Сименс», «АЕГ-Телефункен», «Крафтверк Унион», «Штайнмюллер», «Балке-Дюрр»), швейцарских («Броун Бовери», «Зульцер»), американских («Аллис Чалмерс», «Вестинггауз», «Дженерал Электрик»), японских («Мицубиси»,

«Хитачи», «Тосиба»), английских («Дженерал Электрик», «Парсонс») и французской («Стейн Индустри») фирм, начиная со второй половины 1950^{-х} гг.

Проведён анализ причин неполадок, вызванных конструктивными факторами.

Представлены конструкции, описаны принципы действия сепарационных и перегревателей устройств различных типов, а также концепций существующих типов СПП и систем ПСПП; обсуждаются их достоинства и недостатки, сделан обзор развития и модернизации конструкций.

В приложении 2 приведены таблицы расчётных данных.

В приложении 3 приведён Протокол выполнения испытаний СПП-500-1 на первом блоке СМАЭС, содержащий экспериментальные данные.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Промышленные испытания модернизированных аппаратов СПП-500-1 ТГ № 7, № 8 четвертого блока ЛАЭС, а также ТГ № 1, № 2 первого блока СМАЭС, проведённые с участием автора, позволили получить распределение по периметру аппаратов влажности отсепарированного пара и его температуры в поворотной камере (после первой ступени перегрева), а также расход сепарата нагреваемого пара и конденсата греющего пара первой ступени. Анализ этих данных показал:

- Распределение влаги по периметру СПП носит равномерный характер. Максимальное отклонение от среднего значения не превышает 0,4 % (абс.).

- Величины влажности снизились и приблизились к проектному значению $u \sim 0,5$ %, после модернизации величина влажности на СМАЭС находится в интервале (0,5...0,7) %; на ЛАЭС — в интервале (0,20...0,85) %.

- Особенности конструкции сепарационных блоков не оказывают заметного влияния на величину влажности.

- Распределение температуры нагреваемого пара в поворотной камере СПП на ЛАЭС определяется различной длиной линий подвода греющего пара к группам перегревателей модулей; значения температуры нагреваемого пара в поворотной камере находятся в диапазоне (175...195)°С.

2. Модернизация сепарационной части СПП-500-1 путём замены сепарационных блоков старой конструкции на блоки с жалюзийными пакетами «Powervane» и изменения схемы ввода нагреваемого пара в сепарационные блоки позволила снизить неравномерность нагрузки сепарационных блоков, обеспечить проектную влажность за сепаратором и повысить температуру перегрева пара. Модернизированную сепарационную часть СПП-500-1 можно рассматривать как одну из перспективных конструкций для СПП турбин АЭС.

3. Полученные на ЛАЭС и на СМАЭС группы результатов (влажности и расходы) близки, что свидетельствует в пользу достоверности обеих групп результатов.

4. Наличие конструктивного резерва поверхности перегрева (по сравнению с проектным) СПП-500, полученного с использованием усовершенствованной расчётной методики, подтверждает, что теплогидравлические характеристики

рабочего процесса в СПП-500 со змеевиковым перегревателем предпочтительнее, чем у заменивших их СПП-500-1 с прямотрубным перегревателем, а предлагаемые в диссертации зависимости для теплообмена рекомендуются применять при проектировании СПП.

5. Организация рабочего процесса и конструктивный принцип пароперегревателя СПП-500, обеспечивающие надёжность и необходимую интенсивность и устойчивость теплообмена нагреваемой и греющей сред, позволяют считать их целесообразными для использования при разработке новых СПП для АЭС.

6. Анализ отечественных и зарубежных вариантов организации рабочего процесса в СПП и системах ПСПП позволил определить их достоинства и недостатки, а также сформулировать задачи дальнейших экспериментальных и расчётно-аналитических исследований по повышению эффективности теплогидравлических процессов в системах ПСПП.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

- определение профилей скоростей и влажностей по сечению подводящих трубопроводов нагреваемого пара;
- определение доли влаги, текущей по стенкам трубопроводов (ресиверов) и характера течения (толщины пленок, скорости в пленках);
- изучение характера распределения потоков отсепарированного пара между элементами пароперегревателя;
- получение опытных данных и рекомендаций по теплоотдаче и сопротивлению поверхностей нагрева (по нагреваемому пару) — пучки труб (поперечно обтекаемые), оребренные трубки (низкое оребрение) и поверхности с другими видами интенсификации;
- разработка методики расчета течения в конденсирующих трактах на устойчивость, теплоотдачи при конденсации в вертикальных каналах, образованных системой параллельных труб или каналов;
- выявление режимов с пульсациями температур, разработка рекомендаций для расчетов на термоциклическую прочность.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Егоров М.Ю. Модернизация и анализ результатов испытаний СПП на ЛАЭС. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2011. — № 5 (75). — С. 115–119. **(Перечень ВАК)**
2. Егоров М.Ю. Повышение эффективности систем сепарации и перегрева пара в турбинах АЭС / Егоров М.Ю., Готовский М.А., Федорович Е.Д. // Надёжность и безопасность энергетики. — 2011. — № 3(14). — С. 52–64. **(Перечень ВАК)**
3. Егоров М.Ю. Результаты модернизации СПП турбоустановок на четвёртом блоке ЛАЭС / Егоров М.Ю., Соколов К.В., Блинов М.А., Беленький М.Я., Смолкин Ю.В., Кругликов П.А., Федорович Е.Д. // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2011. — № 130. — С. 263–272. **(Перечень ВАК)**
4. Готовский М.А. Результаты испытаний модернизированных СПП

- турбоустановки К-500-65/3000 энергоблока № 4 ЛАЭС / Готовский М.А., Фокин Б.С., Беленький М.Я., Лебедев М.Е., Блинов М.А., Егоров М.Ю. // Теплоэнергетика. — 2012. — № 2. — С. 27–32. **(Перечень ВАК)**
5. Egorov M. Geometric characteristics influence of the cross-flowed bundles on the heat exchange in separators-superheaters nuclear power plant turbines // Proceedings of the Baltic Heat Transfer Conference. — St. Petersburg: Publishing house of Polytechnical University, 2007. — V.2. — P. 286–291.
6. Егоров М.Ю. Совершенствование системы ПСПП влажнопаровых турбин АЭС: анализ теплогидравлических процессов в конструкциях СПП на основе опыта эксплуатации / Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. // Научно-технич. вестник информационн. технологий, механ. и оптики. — 2007. — № 37. — С. 339–350.
7. Петреня Ю.К. Проблемы теплогидравлики при создании энергооборудования / Петреня Ю.К., Федорович Е.Д., Егоров М.Ю. // Сборник докладов XXXI Сибирского теплофизического семинара. — Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2014. — С. 29–30.
8. Егоров М.Ю. К расчёту теплоотдачи при поперечном обтекании суперплотных шахматных пучков труб / Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. // Труды 1^{-го} Санкт-Петербургского конгресса «Профессиональное образование, наука, инновации в XXI веке». — СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. — С. 205–207.
9. Егоров М.Ю. Процессы теплообмена и гидродинамики в змеевиковом промежуточном перегревателе влажнопаровых турбин АЭС // Сборник трудов научно-технической конф. «Команда-2010». — СПб: СПБАЭП, 2010. — С. 4–6.
10. Егоров М.Ю. К вопросу о модернизации систем ПСПП влажнопаровых турбин АЭС на основе конструктивного принципа СПП-500 / Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. // Труды 1^{-го} СПб конгресса «Профессиональное образование, наука, инновации в XXI веке». — СПб: СПбГУ ИТМО, 2007. — С. 202–204.
11. Егоров М.Ю. Анализ зарубежного опыта эксплуатации СПП / Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. // Труды 3^{-го} СПб конгресса «Профессиональное образование, наука, инновации в XXI веке». — СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. — С. 148–153.
12. Gotovsky M. Problems of thermohydraulic design methods of intermediate separators-reheaters for NPP turbines modernization with account of their long time operation experience / Gotovsky M., Egorov M., Mikhailov V., Sudakov A., Fedorovich E. // Proceedings of 6th Baltic Heat Transfer Conference. Tampere. Finland. ISBN 978-952-15-2639-3. — 2011. — 21 p.
13. Belenky M. Study thermohydraulic characteristics of wet steam flow in separators-reheaters at NPP with RBMK-1000 reactors / Belenky M., Blinov M., Gotovsky M., Egorov M., Mikhailov V., Sudakov A., Fedorovich E. // Proceed. of 6th Balt. Heat Transf. Conf. Tampere. Finland. ISBN 978-952-15-2639-3. — 2011. — 8 p.
14. Егоров М.Ю. Уточнённый расчёт теплоотдачи нагреваемой среды в СПП-500 / Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. // Труды 2^{-го} СПб конгресса «Проф. образ-е, наука, инновации в XXI веке». — СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. — С. 163–164.
15. Егоров М.Ю. Теплообмен в промежуточных СПП типа СПП-500 влажнопаровых турбин АЭС / Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. // XXXVI неделя науки СПбГПУ: матер. Всероссийской межвузовской научно-технической

- конф. студ. и аспирант. — СПб: Политехн. ун-т, 2008. — Ч. IV. — С. 114–115.
16. Егоров М.Ю. Теплогидравлические процессы в промежуточных СПП влажнопаровых турбин АЭС / Материалы XIV Международной конференции «Ломоносов». — М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2007. — Т. II. — С. 144.
17. Егоров М.Ю. Опыт эксплуатации промежуточных СПП влажнопаровых турбин АЭС с РБМК-1000: проблемы и перспективы совершенствования конструкций СПП / Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. // Десятая международн. молод. научн. конф. «Полярное сияние 2007. Ядерное будущее: безопасность, экономика и право»: Сб. тез. докладов. — М.: МИФИ, 2007. — С. 175–183.
18. Егоров М.Ю. Подводимая тепловая мощность и уровень перегрева в СПП-500-1 в условиях эксплуатации на ЛАЭС / Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. // Высокие интеллектуальн. технолог. и инновац. в образ. и науке: мат. XV Межд. научно-методическ. конф. — СПб, Политехн. ун-т, 2008. — Т. 1. — С. 374–376.
19. Егоров М.Ю. Возможности повышения эффективности теплогидравлических процессов в системах ПСПП влажнопаровых турбин АЭС / Егоров М.Ю., Готовский М.А., Федорович Е.Д. // 14^{-й} Минск. международный форум по тепло- и массообмену: тез. докладов и сообщений. — Т. 2, ч. 1. — Минск: Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси, 2012. — С. 271–274.
20. Егоров М.Ю. Результаты испытаний модернизированных СПП-500-1 на СмаЭС и их анализ // Студенты и молодые учёные – инновационной России: мат. работ молодёжн. научной конф. — СПб: Политехн. ун-т, 2013. — С. 43–45.
21. Готовский М.А. Совершенствование конструкций СПП АЭС на основе результатов теоретических и стендовых исследований и опыта эксплуатации / Готовский М.А., Денисов К.Н., Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. // Тезисы 6^{-й} российск. нац. конф. по теплообмену. — Т. 1. — М.: МЭИ, 2014. — С. 111–112.

Сокращения

АЭС–атомная электростанция; ЗиО–Подольский машиностроительный завод; КС–конденсатосборник; ЛАЭС, СмаЭС–Ленинградская, Смоленская АЭС, ПСПП–промежуточная сепарация и перегрев пара; СПП–сепаратор-пароперегреватель; СС–сепаратосборник; ТГ–турбогенератор; ЦВД и ЦНД–цилиндры высокого и низкого давления; ЦКТИ–НПО ЦКТИ им. И.И.Ползунова

Условные обозначения

y –влажность, %, $\sigma_1 = s_1/d$, $\sigma_2 = s_2/d$ относительные поперечные и продольные шаги; Nu , Re , Pr –числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля; I, II–первая, вторая ступени перегревателя СПП; шахм, корид–шахматный, коридорный тип пучка.