

На правах рукописи



**Суханов Владимир Андреевич**

**РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРОТУРБИННЫХ ВОЗДУХООХЛАЖДАЕМЫХ  
КОНДЕНСАТОРОВ НА ОСНОВЕ РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

Специальность 05.04.12 — Турбомашины и комбинированные турбоустановки

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2017 г.



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время сохраняется тенденция роста числа тепловых электрических станций (ТЭС) в различных регионах мира. Применение в составе ТЭС паротурбинных и комбинированных парогазовых установок (ПТУ и ПГУ) с традиционными водоохлаждаемыми конденсаторами приводит к значительному росту показателей водопотребления и теплового загрязнения источников водоснабжения в условиях возрастающих требований к снижению этих показателей, а также образованию кислотных дождей. Поэтому целесообразно применение в составе ПТУ и ПГУ сухих систем охлаждения и, в частности, воздухоохлаждаемых конденсаторов (ВК), исключающих указанные недостатки. На основании изложенного и согласно экспертным оценкам отвод теплоты в термодинамических циклах ПТУ, работающих в составе комбинированных ПГУ и автономно, в XXI веке будет осуществляться, в основном, в ВК. Однако, как следует из литературных источников, рабочий процесс в ВК пока недостаточно изучен, в связи с чем, для повышения эффективности их работы, необходимо проведение комплексных расчётно-экспериментальных исследований.

**Цель и задачи работы.** Цель — разработка рекомендаций по выбору рациональных диапазонов изменения кратности охлаждения и развитию методики теплового расчёта воздухоохлаждаемых конденсаторов, обеспечивающих повышение их эффективности, на основе результатов расчётно-экспериментальных исследований. Для достижения указанной цели необходимо решение следующих задач:

- идентификация важнейших термодинамических параметров, определяющих рабочий процесс в ВК, и стабильность технико-экономических показателей ПТУ, а также факторов, оказывающих влияние на эти параметры; разработка методик расчётно-экспериментального определения этих параметров и факторов;

- разработка и реализация специализированного многофункционального лабораторного стенда, его измерительной схемы и комплекса методик, обеспечивающих проведение экспериментальных исследований рабочего процесса в ВК;

- разработка методики, алгоритма и компьютерной программы расчёта коэффициента теплопередачи в ВК;

- анализ результатов расчётно-экспериментальных исследований и разработка рекомендаций по их использованию для повышения эффективности ВК.

**Научная новизна.** Разработаны научно обоснованная конструкция специализи-

рованного многофункционального лабораторного стенда для экспериментальных исследований рабочего процесса в ВК, а также комплекс методик, обеспечивающих управление этим стендом и проведение экспериментальных исследований.

Впервые на основе стендовых испытаний ВК было определено влияние различных факторов (температуры охлаждающего воздуха на входе в ВК  $t'_{\text{охл.в}}$ , кратности охлаждения  $m$ , удельного массового расхода конденсата  $d_k$ , коэффициента теплопередачи  $\bar{K}$  и относительного массового содержания воздуха в паре на входе в ВК  $\varepsilon'$ ) на его основные термодинамические параметры (переохлаждение конденсата  $\Delta t_k$  и абсолютное давление паровоздушной смеси (ПВС) на входе в ВК  $p'_{\text{пвс}}$ ).

Впервые разработана, алгоритмизирована и автоматизирована методика расчёта коэффициента теплопередачи в ВК, базирующаяся как на рациональном использовании опубликованных условий и результатов экспериментальных исследований теплоотдачи и аэродинамического сопротивления пучков оребренных труб, так и на результатах, выполненных автором, расчётно-экспериментальных исследований теплоотдачи от ПВС к внутренней поверхности стенки труб с учётом реальных условий теплообмена.

Впервые, на основе расчётно-экспериментальных исследований, разработаны рекомендации по выбору рациональных диапазонов изменения  $m$  при различных температурах  $t'_{\text{охл.в}}$ , обеспечивающих минимальное  $\Delta t_k$  с учётом значений давления  $p'_{\text{пвс}}$ , приемлемых для турбоагрегатов.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Создан специализированный многофункциональный лабораторный стенд для исследования рабочего процесса в ВК. Этот стенд целесообразно также использовать для расширения спектра экспериментальных исследований ВК, направленных на дальнейшее повышение эффективности их работы.

Рациональные диапазоны изменения  $m$ , выявленные для различных интервалов изменения  $t'_{\text{охл.в}}$  при заданных значениях  $p'_{\text{пвс}}$  и  $\Delta t_k$ , представляют ценность для разработчиков систем автоматического управления конденсационной установкой.

Разработанная новая, автоматизированная методика расчёта  $\bar{K}$  рекомендуется для использования на начальных стадиях проектирования ВК.

Основные результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс на кафедрах «Турбиностроение и средства автоматики», «Машины и оборудование

энерготехнологических комплексов» и «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели» СПбПУ, а также использованы на ПАО «Силовые машины» в рамках трёх НИР и ОКР, выполненных по заказу этой компании.

**Методология и методы исследования.** Выполненные исследования базировались на фундаментальных физических законах. При проведении экспериментальных и расчётных исследований использовались метод физического моделирования, теория подобия, а также теория вероятности и математической статистики.

**Положения, выносимые на защиту:** научное обоснование конструкции многофункционального лабораторного стенда для исследования рабочего процесса в ВК; результаты стендовых исследований влияния различных факторов ( $t'_{\text{охл.в}}$ ,  $m$ ,  $d_{\text{к}}$ ,  $\bar{K}$  и  $\varepsilon'$ ) на  $\Delta t_{\text{к}}$  и  $p'_{\text{пвс}}$ ; рациональные диапазоны изменения  $m$  при различных температурах  $t'_{\text{охл.в}}$ ; алгоритм и автоматизированная методика расчёта  $\bar{K}$ , базирующиеся на определении термических сопротивлений теплоотдачи пучков оребренных труб с наружной стороны посредством автоматизированной базы данных (АБД) опубликованных условий и результатов экспериментальных исследований теплоотдачи и аэродинамического сопротивления, а с внутренней стороны — посредством формулы Нуссельта, определяющей теплоотдачу при плёночной конденсации неподвижного чистого водяного пара, и поправочного коэффициента  $\chi$ , учитывающего реальные условия теплообмена.

**Степень достоверности результатов** обеспечивалась использованием фундаментальных физических законов, высокоточных измерительных преобразователей и приборов, а также положительными результатами их поверки на момент проведения экспериментальных исследований, повторяемостью результатов этих исследований и приемлемым уровнем оценки неопределённости результатов измерений.

**Апробация результатов.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника и высокие технологии» (Пермь, 2002г.); Международной научно-практической конференции «Современное турбостроение» (Санкт-Петербург, 2004 г.); LIX Научно-технической сессии по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Научно-технические проблемы выбора схем, параметров и материалов современных газотурбинных и парогазовых установок» (Санкт-Петербург, 2012 г.); Научно-технической конференции с международным участием «XLI Неделя науки СПбГПУ» (Санкт-

Петербург, 2012 г.); заседаниях кафедры «Турбиностроение и средства автоматики» ПИМаш (ЛМЗ-ВТУЗ) с участием представителей базовых предприятий и организаций (Санкт-Петербург, 1998 — 2010 гг.); заседании кафедры «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели» СПбПУ (Санкт-Петербург, 2016 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 14 научных работ, из которых 6 — в периодических изданиях ВАК РФ (две работы проиндексированы в базе данных Scopus), одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ и одна монография. Выпущено три отчёта по результатам НИР и ОКР, выполненных при участии автора по заказу ПАО «Силовые машины».

**Структура и объём работы.** Диссертация объёмом 153 страницы состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 107 наименований, двух приложений и содержит 38 рисунков и 15 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, даны основные её характеристики.

**В первой главе** излагается обзор и анализ научных исследований рабочего процесса и конструкций ВК как объекта исследования, выполненных отечественными и зарубежными фирмами (ОАО «ВТИ», ОАО «НПО ЦКТИ», ПАО «Силовые машины», ЗАО НПВП «Турбокон», НИУ «МЭИ», СПбПУ, GEA, SPX, БГТУ (Белоруссия), АГТУ и др.). Показано место ВК в составе ПТУ, упрощённая принципиальная схема которой приведена на рисунке 1.

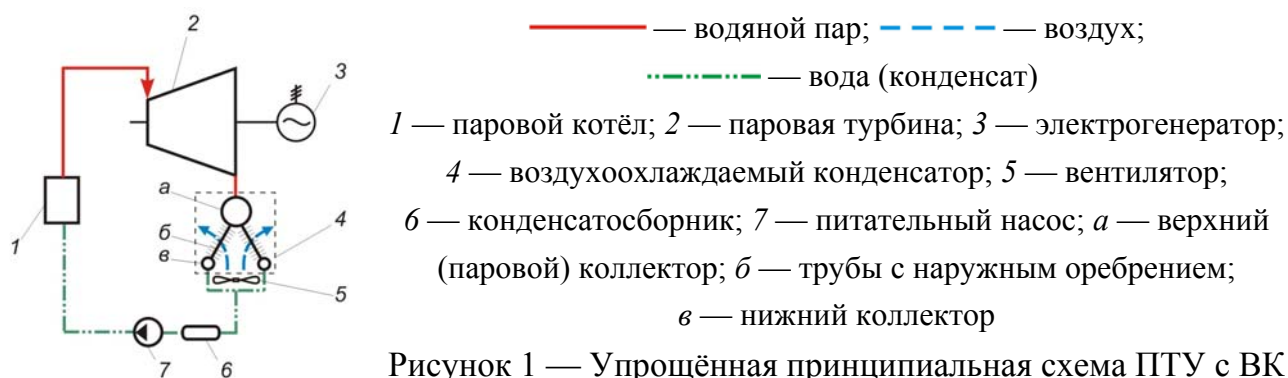
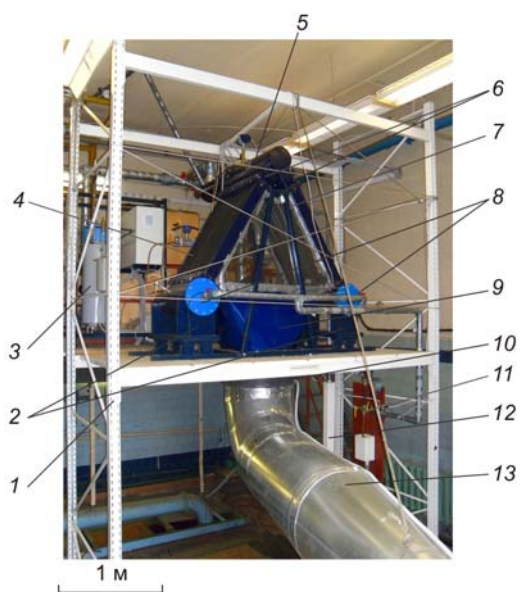


Рисунок 1 — Упрощённая принципиальная схема ПТУ с ВК

Рассмотрена роль ВК в обеспечении стабильности технико-экономических показателей ПТУ. Идентифицированы важнейшие термодинамические параметры ( $p'_{\text{ПВС}}$  и  $\Delta t_k$ ), характеризующие рабочий процесс в ВК, и факторы, оказывающие на них влияние

( $t'_{\text{охл.в}}$ ,  $m$ ,  $d_{\text{к}}$ ,  $\bar{K}$  и  $\varepsilon'$ ). Однако, опубликованные результаты экспериментальных исследований рабочего процесса в паротурбинных ВК недостаточны для выяснения влияния этих факторов на  $p'_{\text{пвс}}$  и  $\Delta t_{\text{к}}$ . В связи с этим поставлены задачи: создание стенда ВК, конструкция которого отвечает требованиям, вытекающим из обзора и анализа литературных источников, и проведения на нём необходимых экспериментальных исследований; разработка комплекса методик по управлению работой стенда и обработке опытных данных; разработка рекомендаций по назначению рациональных диапазонов изменения  $m$  при различных значениях  $t'_{\text{охл.в}}$ ; разработка методики расчёта  $\bar{K}$ .

Во второй главе представлены результаты разработки принципиальной и измерительной схемы стенда ВК, иллюстрирующей функционирование во взаимосвязи пароводяной, газоотводящей и воздушной систем, а также расположение измерительных преобразователей и приборов. На основе разработанной принципиальной и измерительной схемы ВК создан стенд, позволяющий выполнять экспериментальные исследования влияния различных факторов ( $t'_{\text{охл.в}}$ ,  $m$ ,  $d_{\text{к}}$ ,  $\bar{K}$  и  $\varepsilon'$ ) на переохладение конденсата в ВК и давление ПВС на входе в него. Стенд ВК выполнен в соответствии с научно обоснованными требованиями, предъявляемыми к его конструктивному оформлению и техническим характеристикам оборудования, сформулированными на основе анализа литературных источников. Фотография и совмещённая принципиальная и измерительная схема стенда представлены на рисунках 2 и 3.

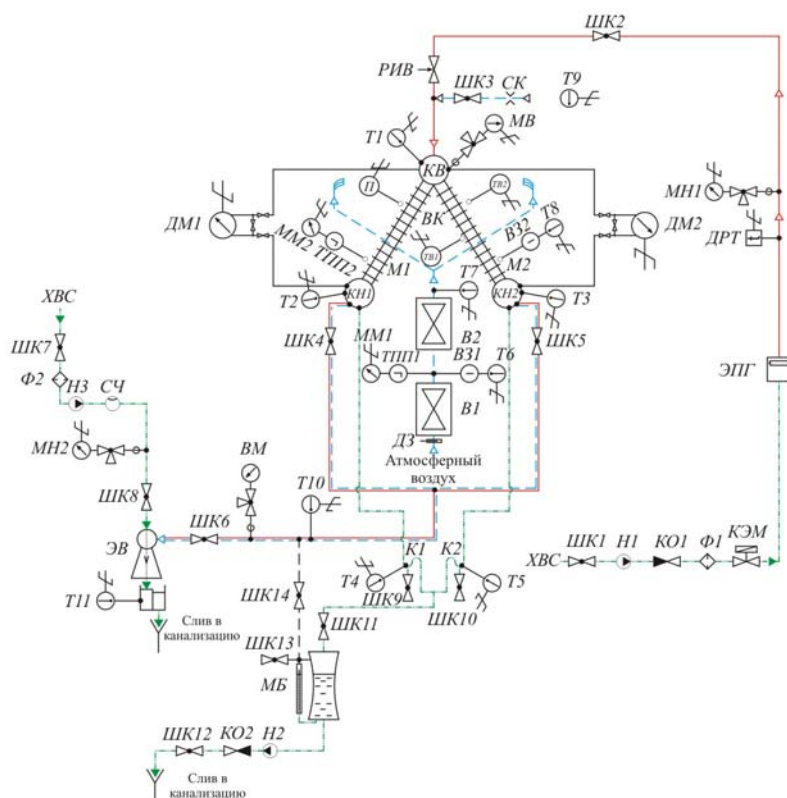


- 1 — двухъярусный стеллаж; 2 — опорные тележки; 3 — электропарогенератор; 4 — теплообменные модули; 5 — коллектор верхний; 6 — переходники; 7 — опорная рама; 8 — коллекторы нижние; 9 — диффузор; 10 — вентилятор; 11 — эжектор водоструйный; 12 — мерный бак; 13 — воздуховод

Рисунок 2 — Фотография многофункционального стенда

Теплообменная матрица (ТМ) ВК сконструирована из биметаллических труб с наружным поперечно-винтовым ленточным  $L$ -образным оребрением и конструктивно

оформлена двумя модулями ( $M1$  и  $M2$ ). Эти трубы изготовлены из следующих материалов: несущие трубы — Сталь 20; оребрение — алюминий. Внутренний диаметр труб — 20,80 мм, а диаметр по основанию ребра — 26,80 мм. Длина поверхности теплообмена труб — 955,0 мм. Коэффициент оребрения — 15,37. Компоновка  $M1$  и  $M2$  в ВК имеет двухскатный вид.  $ТМ$  каждого модуля состоит из 22 труб, расположенных в двух рядах относительно главного направления движения вторичного теплоносителя. Порядок расположения труб в трубных досках — шахматный. Значения поперечного и диагонального абсолютных шагов разбивки труб в трубных досках равны между собой и составляют 56 мм. Площадь поверхности теплообмена каждого модуля — 27,2 м<sup>2</sup>. Угол сопряже-



— водяной пар; — — воздух; — — несконденсировавшиеся газы; — — вода;  
**КВ** — коллектор верхний; **КН1**, **КН2** — коллекторы нижние; **М1**, **М2** — теплообменные модули; **Н1** — **Н3** — насосы; **ШК1** — **ШК14** — шаровые краны; **КО1**, **КО2** — клапаны обратные;  
**Ф1**, **Ф2** — фильтры; **КЭМ** — кран электромагнитный; **ЭПГ** — электропарогенератор;  
**ДРТ** — датчик-реле температуры; **РИВ** — регулирующий (игольчатый) вентиль; **СК** — расходомерное калиброванное сопло; **МБ** — мерный бак; **К1**, **К2** — колена; **СЧ** — счётчик количества воды; **МН1**, **МН2** — манометры; **МВ** — мановакуумметр; **ДМ1**, **ДМ2** — дифференциальные манометры; **ММ1**, **ММ2** — микроманометры; **ВМ** — вакуумметр; **Т1** — **Т11** — термометры; **ТВ1**, **ТВ2** — тепловизоры; **П** — пирометр; **ТПП1**, **ТПП2** — трубки Пито-Прандтля; **В31**, **В32** — воздушные зонды; **ЭВ** — эжектор водоструйный; **В1**, **В2** — вентиляторы; **ДЗ** — дроссельная заслонка; **ХВС** — холодное водоснабжение

Рисунок 3 — Совмещённая принципиальная и измерительная схема стенда



ния теплообменных модулей с верхним коллектором составляет  $60^\circ$ .

Массовый расход перегретого водяного пара не превышал  $0,023$  кг/с, что обеспечивало максимальную скорость движения ПВС в трубах ВК  $54,9$  м/с, при которой эрозионные процессы и потери давления минимальны. Пар поступал из ЭПГ в КВ по паропроводу, на котором последовательно располагается следующая запорная арматура: ШК2, необходимый для экстренного отключения подачи пара; РИВ, посредством которого осуществлялось плавное дросселирование пара. Избыточное давление пара в тракте перед РИВ составляло приблизительно  $215,7$  кПа, постоянство которого обеспечивалось системой управления ЭПГ, оснащённой электроконтактным манометром МН1. Постоянство значения температуры в этом тракте обеспечивалось применением тепловой изоляции и теплоотражающего кожуха. Абсолютное давление и температура в тракте за РИВ, то есть в КВ конденсатора, варьировались на установившихся режимах работы от  $3,49$  до  $84,27$  кПа и от  $66,25$  до  $98,31^\circ\text{C}$ , что обеспечивало критический перепад давлений на игольчатом вентиле. На режиме пуска стенда вакуум в ВК обеспечивался работой водоструйного эжектора, а на установившихся режимах — конденсацией пара при работающем ЭВ. Полученный водяной пар попадал в ВК, где происходила его конденсация. Теплота, выделившаяся при конденсации водяного пара, отводилась охлаждающим воздухом, омывавшим трубы М1 и М2 с наружной стороны. Конденсат стекал через КН1 и КН2 в колена К1 и К2, представляющие собой простейшие гидрозатворы, а затем — в МБ. Слив конденсата из МБ по мере его накопления осуществлялся насосом Н2 при открытом ШК12. Воздушная система стенда предусматривала забор воздуха с улицы и последующее нагнетание его через воздухопровод к М1 и М2 посредством последовательно расположенных осевых вентиляторов В1 и В2 типа ВО-6,3, приводимых электродвигателями мощностью  $1,5$  кВт и частотой вращения  $1500$  1/мин. Скорость движения охлаждающего воздуха в узком сечении трубного пучка на номинальном режиме работы составляла от  $6$  до  $7$  м/с, что обеспечивалось рациональным выбором компоновки ТМ и производительности вентилятора. Для поддержания в рамках одного режима испытания постоянного значения  $t'_{\text{охл.в}}$  забор охлаждающего воздуха осуществлялся с улицы, а его транспортировка к ВК, установленному в лаборатории, — по воздухопроводу. Измерительные преобразователи и приборы, используемые в оснащении стенда, в соответствии с типом выходного сигнала были распределены по трём систе-

мам сбора информации, две из которых работали в автоматическом режиме.

Разработаны методики, содержащие алгоритмы управления работой стенда на режимах пуска, останова и перевода его с одного установившегося режима на другой.

**В третьей главе** применительно к научно обоснованной конструкции ВК разработаны методики расчётно-экспериментального определения важнейших термодинамических параметров ( $p'_{\text{ПВС}}$  и  $\Delta t_{\text{к}}$ ) и факторов, оказывающих влияние на эти параметры.

Абсолютное давление ПВС на входе в ВК определялось по выражению  $p'_{\text{ПВС}} = p_{\text{б}} + p_{\text{МВ}}$ , составляющими которого являются давления, определяемые для атмосферного воздуха показанием барометра  $p_{\text{б}}$ , а для ПВС — показанием мановакуумметра  $p_{\text{МВ}}$ . Величина  $\Delta t_{\text{к}}$  определялась разностью температур насыщенного пара  $t'_{\text{нп}} = f(p'_{\text{п}})$  и его конденсата на выходе из ВК  $t''_{\text{к}}$ . Температура  $t''_{\text{к}}$  в *K1* и *K2* измерялась термометрами *T4* и *T5*. Парциальное давление пара на входе в ВК  $p'_{\text{п}}$ , определялось из совместного рассмотрения закона Дальтона и уравнения Менделеева – Клапейрона в зависимости от  $p'_{\text{ПВС}}$  и относительного массового содержания воздуха в паре на входе в ВК  $\varepsilon' = G_{\text{в}}/G'_{\text{п}}$ . Величина массового расхода воздуха, проникавшего в ВК  $G_{\text{в}}$ , определялась суммой трёх составляющих:  $G_{\text{вп}}$  — с паром;  $G_{\text{внпл}}$  — через неплотности в элементах конструкции стенда, находившихся под разрежением;  $G_{\text{вск}}$  — через *СК*. Значения  $G_{\text{впв}}$  и  $G_{\text{внпл}}$  были получены путём обобщения результатов многочисленных опытов. Для оценки  $G_{\text{вск}}$  использовались: геометрические характеристики *СК*, показания *T9* и барометра. Массовый расход пара  $G'_{\text{п}}$ , поступающего из *ЭПГ* в ВК определялся по средней скорости повышения уровня конденсата в *МБ* при закрытых *ШК4* и *ШК5*.

Температура  $t'_{\text{охл.в}}$  определялась по показаниям *T7*, установленного в обечайке диффузора. Кратность охлаждения определялась отношением массовых расходов в ВК охлаждающего воздуха  $G_{\text{охл.в}}$  и конденсата  $G''_{\text{к}}$ . В свою очередь,  $G_{\text{охл.в}}$  определялся посредством *ММ1* с *ТПП1* путём траверсирования потока воздуха в 24 точках горизонтального и вертикального направлений поперечного сечения воздуховода.  $G''_{\text{к}}$  определялся по средней скорости повышения уровня конденсата в *МБ* при открытых *ШК4*, *ШК5* и *ШК6*, а удельный массовый расход конденсата  $d_{\text{к}}$  — отношением  $G''_{\text{к}}$  к полной наружной площади поверхности теплообмена ВК  $F_{\text{н}}$ . Величина  $\bar{K}$  определялась урав-

нением  $\bar{K} = Q / (F_H \cdot \Delta t)$ , где  $Q = G_K'' \cdot (i'_\Pi - i''_K) + G_\Pi'' \cdot (i'_\Pi - i''_\Pi) + G_B \cdot (i'_B - i''_B)$  — тепловая мощность, переданная от первичного теплоносителя ко вторичному;  $\Delta t = (t''_{\text{охл. в}} - t'_{\text{охл. в}}) / \ln((t'_{\text{нп}} - t'_{\text{охл. в}}) / (t'_{\text{нп}} - t''_{\text{охл. в}}))$  — среднелогарифмический температурный напор;  $G_\Pi'' = G'_\Pi - G_K''$  — массовый расход пара в *KH1* и *KH2*;  $i'_\Pi$  и  $i''_\Pi$  — энтальпия пара в *KB*, *KH1* и *KH2*;  $i''_K$  — энтальпия конденсата в *K1* и *K2*;  $i'_B$  и  $i''_B$  — энтальпия воздуха в *KB*, *KH1* и *KH2*;  $t''_{\text{охл. в}}$  — средняя температура охлаждающего воздуха на выходе из ВК, определяемая посредством *T8* с *B32* и *MM2* с *TПП2*. Значения энтальпий  $i'_\Pi = f(p'_\Pi, t'_{\text{пвс}})$ ,  $i''_\Pi = f(p''_\Pi, t''_{\text{пвс}})$  и  $i''_K = f(p''_K, t''_K)$  определялись по таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара, реализованным в компьютерной программе в виде библиотеки функций. При этом значения температур ПВС в *KB*, *KH1* и *KH2* ( $t'_{\text{пвс}}$  и  $t''_{\text{пвс}}$ ) определялись показаниями *T1*, *T2* и *T3*. Энтальпии  $i'_B$  и  $i''_B$  находились по таблицам теплофизических свойств сухого воздуха, реализованным также в виде библиотеки функций в компьютерной программе, с учётом  $t'_{\text{пвс}}$  и  $t''_{\text{пвс}}$ . Парциальное давление пара в нижних коллекторах  $p''_\Pi$  получено из совместного рассмотрения закона Дальтона и уравнения Менделеева – Клапейрона в зависимости от  $p'_{\text{пвс}}$ , потерь давления ПВС в ВК  $\Delta p_{\text{пвс}}$  и относительного массового содержания воздуха в паре на выходе из ВК  $\varepsilon'' = G_B / G_\Pi''$ . Значение  $\Delta p_{\text{пвс}}$  определялось показаниями ДМ1 и ДМ2.

Разработаны новые методика, алгоритм и компьютерная программа расчёта  $\bar{K}$ , отвечающие требованиям: вычисление его среднего значения без проведения специальных экспериментальных исследований; рациональное использование опубликованного весьма обширного научного потенциала по условиям и результатам экспериментальных исследований теплоотдачи и аэродинамического сопротивления *ТМ* ВК; использование частных критериальных уравнений по теплоотдаче, обеспечивающих более высокую точность расчётов по сравнению с обобщёнными критериальными уравнениями; оперативность выполнения многовариантных расчётов, а, следовательно, и принятия рациональных технических решений. Коэффициент  $\bar{K}$  рассчитывался по выражению

$$\bar{K} = \left( \frac{1}{\alpha_{\text{охл. в}}} + d_o \cdot \varphi \cdot \ln \left( \frac{d_o}{d_H} \right) / (2 \cdot \lambda_p) + d_o \cdot \varphi \cdot \ln \left( \frac{d_H}{d_B} \right) / (2 \cdot \lambda_{\text{тр}}) + \frac{d_o}{d_B} \cdot \frac{\varphi}{\alpha_{\text{пвс}}} \right)^{-1} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

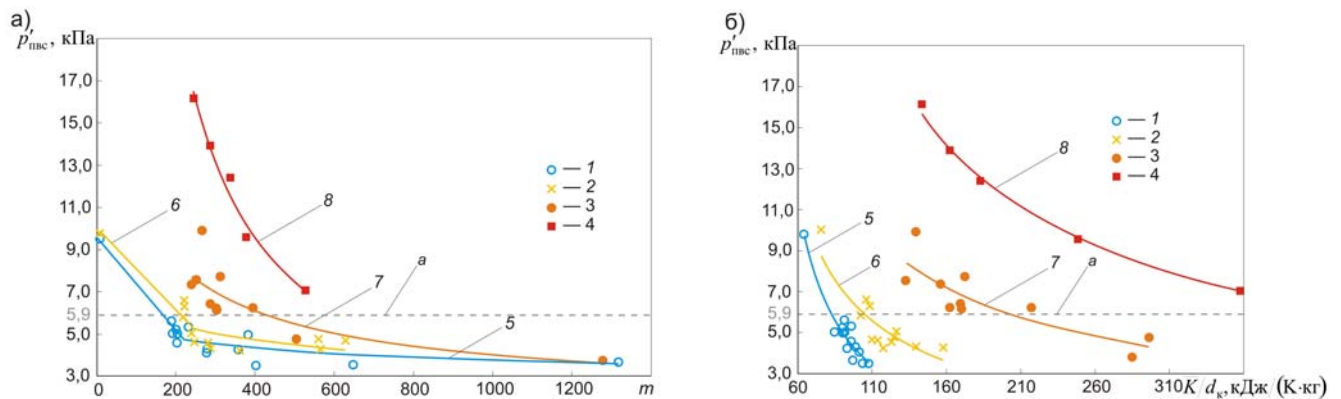
где  $\bar{\alpha}_{\text{охл. в}}$  — средний коэффициент теплоотдачи от наружной оребренной поверхности труб к охлаждающему воздуху, определяемый компьютерной программой посредством зависимости  $p'_{\text{пвс}} = f(m, t'_{\text{охл. в}})$ , полученной опытным путём, и специально разработанной АБД, содержащей опубликованные условия и результаты экспериментальных исследований теплоотдачи и аэродинамического сопротивления;  $d_o$ ,  $d_n$  и  $d_b$  — диаметры оребренных труб по основанию ребра и несущих труб по наружной и внутренней поверхностям стенки;  $\varphi = F_n/F_o$  — коэффициент оребрения;  $F_o$  — площадь наружной поверхности теплообмена на диаметре  $d_o$ ;  $\lambda_p$  и  $\lambda_{\text{тр}}$  — коэффициенты теплопроводности материалов ребра и труб, несущих оребрение;  $\bar{\alpha}_{\text{пвс}} = Q/(F_b \cdot \Delta t_{\text{пвс}})$  — средний коэффициент теплоотдачи от конденсирующейся паровой составляющей ПВС к стенке труб;  $F_b$  — площадь внутренней поверхности теплообмена ВК;  $\Delta t_{\text{пвс}} = \bar{t}_{\text{пвс}} - \bar{t}_{\text{в.ст}}$  — температурный напор, определяемый разностью температур ПВС  $\bar{t}_{\text{пвс}}$  и внутренней поверхности стенок труб  $\bar{t}_{\text{в.ст}}$ , осреднёнными по  $F_b$ . В дальнейшем это позволило построить и аппроксимировать графические зависимости поправочного коэффициента  $\chi = \bar{\alpha}_{\text{пвс}}/\bar{\alpha}_{\text{п. Nu}}$  от средней скорости ПВС на входе в трубы  $\bar{c}'_{\text{пвс}} = 4 \cdot (G'_n + G'_b)/(\rho'_{\text{пвс}} \cdot \pi \cdot d_b^2 \cdot n_{\text{тр}})$  и температуры охлаждающего воздуха  $t'_{\text{охл. в}}$ . Здесь:  $\bar{\alpha}_{\text{п. Nu}}$  — коэффициент теплоотдачи, определяемый формулой Нуссельта;  $\rho'_{\text{пвс}} = \rho'_{\text{нп}} + \rho'_b$  — плотность ПВС;  $\rho'_{\text{нп}}$  и  $\rho'_b$  — плотности насыщенного пара и воздуха;  $n_{\text{тр}}$  — число труб в ВК.

**В четвёртой главе** содержатся результаты экспериментальных исследований, полученные на 77 различных установившихся режимах работы ВК. На основании этих результатов исследовано влияние  $t'_{\text{охл. в}}$ ,  $m$ ,  $d_k$ ,  $\bar{K}$  и  $\varepsilon'$  на  $p'_{\text{пвс}}$  и  $\Delta t_k$  (см. рисунки 4 и 5) и разработаны рекомендации по повышению эффективности ВК.

Показано, что применение ВК в составе ПТУ может привести к значительному возрастанию требований как к обеспечению герметичности трактов этих установок, находящихся под разрежением, так и к выбору типа и производительности воздухоудаляющих устройств (см. рисунок 5 б).

Путём совместного рассмотрения рисунков 4 (а) и 5 (а) с учётом функций, аппроксимирующих, представленные на рисунке 4 (а), графические зависимости, опреде-

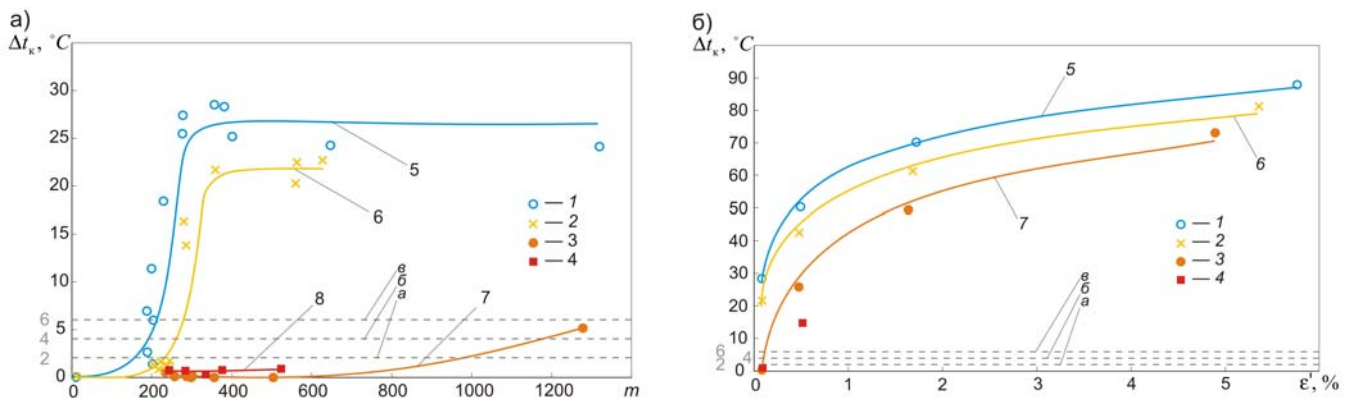
лены, приведённые в таблицах 1 и 2, рациональные диапазоны изменения кратности охлаждения для различных (стандартных и альтернативных) конструктивных схем включения ВК в состав ПТУ.



1, 2, 3, 4 — экспериментальные точки, соответствующие температурам охлаждающего воздуха на входе в ВК минус 4 — 1 °С, 4 — 9 °С, 16 — 22 °С и 30 — 33 °С; 5, 6, 7, 8 — аппроксимирующие линии; а — линия, обозначающая наименьший уровень расчётного абсолютного давления ПВС на входе в ВК реальных ПТУ

Рисунок 4 — Зависимости давления ПВС в верхнем коллекторе ВК от:

а —  $m$  и  $t_{\text{охл.в}}$ ; б — комплекса  $\bar{K}/d_k$  и  $t_{\text{охл.в}}$



1, 2, 3, 4 — экспериментальные точки, соответствующие температурам охлаждающего воздуха на входе в ВК минус 4 — 1 °С, 4 — 9 °С, 16 — 22 °С и 30 — 33 °С; 5, 6, 7, 8 — аппроксимирующие линии; а, б, в — линии, обозначающие условно ограничивающие характерные диапазоны изменения значений переохлаждения конденсата

Рисунок 5 — Зависимости переохлаждения конденсата от:

а —  $m$  и  $t'_{\text{охл.в}}$ ; б —  $\varepsilon'$  и  $t'_{\text{охл.в}}$

Под альтернативными конструктивными схемами подразумеваются следующие: сочетание ВК с водоохлаждаемым конденсатором; организация охлаждения поверхностей теплообмена ВК посредством естественной тяги; организация впрыска воды в поток охлаждающего воздуха на входе в ВК.

Таблица 1 — Рациональные диапазоны изменения кратности охлаждения в случае применения стандартной (см. рисунок 1) конструктивной схемы включения ВК в состав ПТУ

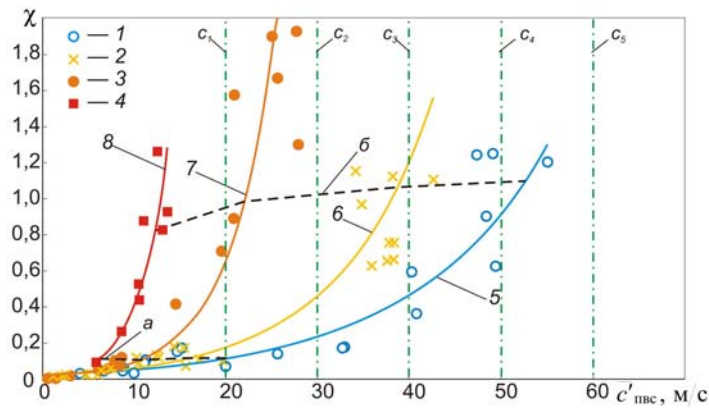
Диапазоны изменения величин					
$p'_{\text{ПВС}}, \text{кПа}$	$t'_{\text{ОХЛ.В}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{к}}, ^\circ\text{C}$			$m$
6,2 — 9,7	минус 4 — 1	От 0 до 2	включ.	154 — 0	
		» 2 » 4	»	—	
		» 4 » 6	»	—	
5,9 — 9,9	4 — 9	От 0 до 2	включ.	215 — 10	
		» 2 » 4	»	—	
		» 4 » 6	»	—	
5,9 — 34,0	16 — 22	От 0 до 2	включ.	430 — 10	
		» 2 » 4	»	—	
		» 4 » 6	»	—	
5,9 — 34,0	30 — 33	От 0 до 2	включ.	620 — 126	
		» 2 » 4	»	—	
		» 4 » 6	»	—	

Таблица 2 — Рациональные диапазоны изменения кратности охлаждения в случае применения альтернативных конструктивных схем включения ВК в состав ПТУ

Тип электростанции	Диапазоны изменения величин			
	$p'_{\text{ПВС}}, \text{кПа}$	$t'_{\text{ОХЛ.В}}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t_{\text{к}}, ^\circ\text{C}$	$m$
КЭС	3,5 — 5,5	минус 4 — 1	0 — 2	—
	5,3 — 5,5	4 — 9		235 — 204
	4,1 — 5,5	16 — 22		970 — 502
	3,5 — 5,5	30 — 33		990 — 660
ТЭЦ	6,2 — 9,0	минус 4 — 1	0 — 2	154 — 31
	6,0 — 9,0	4 — 9		210 — 56
	6,0 — 9,0	16 — 22		414 — 170
	6,0 — 9,0	30 — 33		610 — 420

Получены и представлены на рисунке 6 зависимости поправочного коэффициента  $\chi$  от  $\bar{c}'_{\text{ПВС}}$  и  $t'_{\text{ОХЛ.В}}$ , необходимые для реализации компьютерной программы расчёта коэффициента теплопередачи.

На основе разработанных методики, алгоритма и компьютерной программы расчёта  $\bar{K}$  даны рекомендации по выбору предпочтительного варианта конструктивного оформления теплообменной матрицы ВК на основе сравнительного анализа результатов расчёта коэффициентов теплоотдачи и потерь давления при варьируемых значениях величины массового расхода охлаждающего воздуха для последующего технико-экономического обоснования принятого варианта.



$a, b$  — линии, условно ограничивающие область совместного влияния  $\bar{\alpha}_{\text{пвс}}$  и  $\bar{\alpha}_{\text{охл.в}}$  на величину  $\bar{K}$ ;  $c_1 — c_5$  — линии постоянных скоростей ПВС; 1, 2, 3, 4 — экспериментальные точки, соответствующие температурам охлаждающего воздуха на входе в ВК минус  $4 — 1^\circ\text{C}$ ,  $4 — 10^\circ\text{C}$ ,  $15 — 22^\circ\text{C}$  и  $30 — 33^\circ\text{C}$ ; 5, 6, 7, 8 — аппроксимирующие линии

Рисунок 6 — Зависимости поправочного коэффициента  $\chi$  от  $\bar{c}'_{\text{пвс}}$  и  $t'_{\text{охл.в}}$

Была выполнена верификация путём определения принадлежности значений  $m$ , полученных расчётом по предложенным аппроксимирующим функциям при проектных значениях  $t'_{\text{охл.в}}$  и  $p'_{\text{пвс}}$  реальных ПТУ с ВК, рекомендуемым рациональным диапазонам изменения кратности охлаждения, содержащимся в таблице 1. Результаты верификации отражены в таблице 3.

Таблица 3 — Результаты верификации расчётных и рекомендуемых значений кратности охлаждения

Наименование электростанции	Год пуска	Мощность турбоагрегата, МВт	Расчётные параметры			Рекомендуемый рациональный диапазон $m$	Результат верификации
			$t'_{\text{охл.в}}, ^\circ\text{C}$	$p'_{\text{пвс}}, \text{кПа}$	$m$		
Gerber Cogen	1981	3,7	8,9	6,9	164	215 — 10	+
Potter Station	1993	20,0	18,9	12,9	77	430 — 10	+
Datong №1	2003	160,0	16,0	16,0	48	430 — 10	+
Athens Power Station	2000	120,0	32,2	16,9	237	620 — 126	+
Hancheng	2007	600,0	33,0	31,2	136	620 — 126	+
Ruiguang	2008	300,0	32,0	28,0	150	620 — 126	+

Удовлетворительный результат верификации обозначен символом «+»

Верификация результатов расчёта коэффициента теплопередачи в ВК, выполненных посредством разработанной компьютерной программы, осуществлялась путём сравнения этих результатов с результатами определения  $\bar{K}$ , полученными решением уравнения теплопередачи, а также по предлагаемой методике, использующей конкретные опытные данные вместо аппроксимирующих функций  $p'_{\text{пвс}} = f(m, t'_{\text{охл.в}})$  и

$\chi = f(\bar{c}'_{\text{ПВС}}, t'_{\text{охл. в}})$ . Для рабочих значений удельного теплового потока отклонение значений  $\bar{K}$ , рассчитанных по компьютерной программе, от значений  $\bar{K}$ , определённых посредством методики, использующей конкретные опытные данные, составляет от 0,0 до 11,4%, а отклонение от значений  $\bar{K}$ , полученных решением уравнения теплопередачи, — от 2,3 до 19,4%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1 Созданы специализированный лабораторный стенд научно обоснованной конструкции и методическое обеспечение по управлению его работой, позволившие выполнить необходимый комплекс экспериментальных исследований рабочего процесса в ВК.

2 По результатам анализа литературных источников выявлены важнейшие термодинамические параметры, определяющие рабочий процесс в ВК и стабильность технико-экономических показателей ПТУ. Определены факторы, влияющие на эти параметры. Разработан комплекс методик расчётно-экспериментального определения этих параметров и факторов применительно к научно обоснованной конструкции стенда ВК.

3 Впервые в результате стендовых испытаний ВК исследовано влияние температуры охлаждающего воздуха  $t'_{\text{охл. в}}$ , кратности охлаждения  $m$ , удельного массового расхода конденсата  $d_k$ , коэффициента теплопередачи  $\bar{K}$  и относительного массового содержания воздуха в паре  $\varepsilon'$  на переохлаждение конденсата  $\Delta t_k$  и абсолютное давление ПВС  $p'_{\text{ПВС}}$ .

4 Впервые разработаны методика и алгоритм расчёта коэффициента теплопередачи  $\bar{K}$  в ВК, реализующие новые подходы к определению коэффициентов теплоотдачи, в основу которых положены результаты экспериментальных исследований, полученные в процессе стендовых испытаний.

5 Разработана компьютерная программа, позволяющая оперативно осуществлять варианты расчёты  $\bar{K}$ , а их результаты использовать для принятия рациональных технических решений, направленных на дальнейшее повышение эффективности ВК.

6 Впервые определены рациональные диапазоны изменения кратности охлаждения  $m$  при различных температурах охлаждающего воздуха на входе в ВК, необходимые для принятия научно обоснованных технических решений как на начальных стадиях проектирования и модернизации ПТУ, так и при назначении оптимальных режимов



эксплуатации.

7 Созданы материально-технические и методические основы для решения экономических и экологических проблем совершенствования конденсационных установок.

#### СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ, ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Богов, И. А. Стенд для исследования рабочих процессов в паротурбинных воздухоохлаждаемых конденсационных установках [Текст] / И. А. Богов, А. П. Безухов, В. А. Суханов, И. Д. Волковицкий, Н. Ю. Донцов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер. Наука и образование. — 2012. — № 4 (159). — С. 52 — 59.

2. Суханов, В. А. Исследование и совершенствование теплообменных матриц паротурбинных воздухоохлаждаемых конденсаторов посредством специализированной автоматизированной базы данных [Текст] / В. А. Суханов, И. А. Богов, А. П. Безухов // Электрические станции. — 2015. — №10. — С. 56 — 60.

3. Суханов, В. А. Экспериментальное исследование переохлаждения конденсата на модели воздухоохлаждаемого конденсатора [Текст] / В. А. Суханов, А. П. Безухов, И. А. Богов, Н. Ю. Донцов, И. Д. Волковицкий, В. В. Толмачев // Теплоэнергетика. — 2016. — № 1. — С. 19 — 25. DOI: 10.1134/S0040363615090106.

4. Sukhanov, V. A. Experimental Study of Condensate Subcooling with the Use of a Model of an Air-Cooled Condenser [Текст] / V. A. Sukhanov, A. P. Bezukhov, I. A. Bogov, N. Y. Dontsov, I. D. Volkovitsky, and V. V. Tolmachev // Thermal Engineering. — 2016. — №1. — Vol.63. — P. 17 — 23. DOI: 10.1134/S0040601515090104.

5. Суханов, В. А. Расчётно-экспериментальные исследования теплообмена в модели воздухоохлаждаемого конденсатора [Текст] / В. А. Суханов, И. А. Богов, А. П. Безухов, В. В. Толмачев // Электрические станции. — 2016. — №4. — С. 23 — 28.

6. Sukhanov, V. A. Numerical-Experimental Studies of the Heat Transfer in an Air-Cooled Condenser Model [Текст] / V. A. Sukhanov, A. P. Bezukhov, I. A. Bogov, and V. V. Tolmachev // Power Technology and Engineering. — 2016. — №3. — Vol.50. — P. 318 — 322. DOI: 10.1007/S10749-016-0704-9.

7. Свидетельство №2012660792 Российская Федерация. Расчёт трубных пучков конденсаторов пара уплотнений турбин: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / И. А. Богов, А. П. Безухов, В. А. Суханов; заявитель и правообладатель: Открытое акционерное общество «Силовые машины — ЗТЛ, ЛМЗ, Электросила, Энергомашэкспорт» (Ru). — №2012618291; заявл. 02.10.2012; зарегистр. 28.11.2012.

8. Богов, И. А. Состояние и пути совершенствования воздухоохлаждаемых энергетических конденсаторов [Текст] / И. А. Богов, В. В. Назаров, В. А. Суханов // Современное турбостроение: сб. науч. тр. — Санкт-Петербург: Изд-во МАН ВШ. Санкт-Петербургское отделение. ПИМаш, 1999. — Вып. 2. — С. 59—61.

9. Богов, И. А. К вопросу оптимизации пучков труб с наружным поперечным оребрением [Текст] / И. А. Богов, В. А. Суханов // Современное турбостроение: сб. науч. тр. — Санкт-Петербург: Изд-во МАН ВШ. Санкт-Петербургское отделение. ПИМаш, 2000. — Вып. 3. — С. 111 — 113.

10. Суханов, В. А. Компьютерная база данных результатов экспериментальных исследований теплоотдачи и аэродинамического сопротивления пучков оребренных труб [Текст] / В. А. Суханов // Аэрокосмическая техника и высокие технологии — 2002: материалы Всероссийской научно-технической конференции / под. ред. Ю. В. Соколкина и А. А. Чекалкина, Пермь, 10 – 12 апреля 2002 г. / — Пермь: ПГТУ, 2002. — С. 255.

11. Суханов, В. А. Программная реализация теплового и гидроаэродинамического расчёта воздухоохлаждаемых конденсаторов энергетических паротурбинных установок [Текст] / В. А. Суханов // Современное турбостроение: материалы междунар. науч. - практ. конф., 28 — 30 сентября 2004 г. / — Санкт-Петербург: Изд-во МАН ВШ. Санкт-Петербургское отделение. ПИМаш, 2004. — С. 49 — 51.

12. Теплообменные аппараты газотурбинных установок. Основы проектирования: монография [Текст] / И. А. Богов, В. А. Суханов, А. П. Безухов, В. В. Толмачев, А. А. Смирнов, А. И. Бодров; под общ. ред. И. А. Богова. — СПб.: ООО «Издательство «Полигон», 2010. — 208 с.: ил.; — Библиогр.: с. 202 — 203. — 500 экз. — ISBN 978-5-89173-428-9.

13. Богов, И. А. Моделирование рабочих процессов воздухоохлаждаемых конденсаторов парогазовых установок [Текст] / И. А. Богов, В. В. Назаров, В. А. Суханов // — С-Пб.: LIX Научно-техническая сессия по проблемам газовых турбин и парогазовых установок «Научно-технические проблемы выбора схем, параметров и материалов современных газотурбинных и парогазовых установок»: тезисы докладов, г. Санкт-Петербург, 5 — 7 сентября 2012., ОАО «ВТИ», 2012 г, с. 115 — 116.

14. Суханов, В. А. Экспериментальные исследования влияния конструкции проточной части камеры смешения водоструйного эжектора воздухоохлаждаемой конденсационной установки на его рабочую характеристику [Текст] / В. А. Суханов, Н. Ю. Донцов, И. Д. Волковицкий, А. П. Безухов // XLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. 3-8 декабря 2012 г. Ч. III. / — СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2012. — С. 65 — 66.