

ОТЗЫВ

официального оппонента Ледуховского Григория Васильевича
на диссертацию Зиганшиной Светланы Камилловны
**«Энергосбережение в котельных установках тепловых электрических
станций за счет использования вторичных энергоресурсов»**,
представленную на соискание ученой степени доктора технических наук
по специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции,
их энергетические системы и агрегаты»

Актуальность темы диссертации

Согласно прогнозу научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России на период до 2035 года, в качестве одной из основных задач энергетической отрасли на ближайшую перспективу выдвинуто создание конкурентоспособных отечественных технологий и оборудования для уменьшения углеродного следа энергетики, в том числе путем повышения показателей тепловой экономичности генерирующего оборудования.

Энергосбережение остается приоритетом развития энергетики, поскольку обеспечивает не только уменьшение затрат при производстве энергии, но и в существенной мере определяет темпы декарбонизации экономики страны в целом, а именно проблемы экологичности выходят в настоящее время на первый план. Консолидация научного потенциала и возможностей энергетической отрасли, согласно рассматриваемому прогнозу, должна обеспечить устранение технологического отставания России в секторе генерирующего оборудования и снижение энергоемкости ВВП страны до уровня, характерного для стран-конкурентов.

Диссертация Зиганшиной С.К. посвящена разработке технологий повышения эффективности котельных установок ТЭС с целью энергосбережения, экономии материальных ресурсов и органического топлива и охраны окружающей среды путем использования вторичных тепловых энергоресурсов. Таким образом, тема рассматриваемой диссертации в полной мере соответствует задачам научно-технологического развития отраслей топливно-энергетического комплекса России.

При выборе базовых параметров оборудования, особенно традиционного паросилового цикла, обычно используются результаты решения задач технологического проектирования и технико-экономической оптимизации, полученные в прошлом веке при относительно дешевом топливе и совершенно других механизмах тарифообразования и возврата инвестиций (включая отсутствие учета «карбоновых» налогов, введение которых, по-видимому, следует ожидать в ближайшей перспективе). Поэтому в настоящее время остро необходимы не только создание новых энергоэффективных технологий, но и пересмотр и корректировка стандартных, «клиповых», технологических решений, традиционно применяемых в энергетической отрасли России.

В диссертации Зиганшиной С.К. внимание уделено как мало освоенным отечественной энергетикой технологиям, например технологиям глубокого охлаждения уходящих газов энергетических котлов, так и повышению эффективности существующих решения, например в областях ведения водно-химического режима барабанных котлов или термической деаэрации воды.

Таким образом, тему диссертации Зиганшиной С.К. следует признать актуальной, а решаемые в диссертации задачи – отвечающими критическим направлениям развития энергетической отрасли России.

Общая характеристика и оценка содержания диссертации

Для рассмотрения представлены следующие материалы: диссертация на 449 страницах машинописного текста формата А4, состоящая из введения, восьми глав, изложенных в трех частях, выводов (заключения), списка используемой литературы и 6 приложений; автореферат на 36 страницах машинописного текста формата А5.

Во введении обоснована актуальность, сформулированы цель и задачи исследования, заявлена научная новизна, теоретическая и практическая ценность результатов работы, сформулированы положения, выносимые на защиту, обоснованы применяемые в работе методы исследования и достоверность полученных результатов, отмечен личный вклад автора в получение результатов, приведены сведения об апробации результатов работы, а также данные о публикациях по теме диссертации.

В главе 1 диссертации представлены результаты проведенного автором анализа отечественных и зарубежных источников по разработке и исследованию технических решений в области повышения эффективности работы котельных установок.

Показано, что наиболее значимые результаты могут быть достигнуты посредством разработки технологий глубокого охлаждения (ниже точки росы) уходящих продуктов сгорания в конденсационных теплоутилизаторах, снижения затрат на непрерывную продувку паровых котлов, совершенствования конструкций вакуумных струйно-барботажных и вакуумно-кавитационных деаэраторов подпиточной воды тепловой сети, схем утилизации теплоты подогретого воздуха газоотводящих труб ТЭС с вентилируемым воздушным зазором, предварительного подогрева дутьевого воздуха котла теплотой конденсации отработавшего в турбине водяного пара и теплотой отработавших в котлоагрегате газов при их охлаждении ниже точки росы.

В области повышения энергоэффективности ПГУ-ТЭС сделан вывод о том, что одним из перспективных направлений, с точки зрения экономичности и возможности практической реализации, является отвод уходящих газов котла-утилизатора газотурбинной установки в атмосферу через вытяжную башню градирни с естественной вентиляцией воздуха, а также промежуточный перегрев водяного пара в двухконтурном котле-утилизаторе ГТУ в зоне пониженных температур греющего теплоносителя.

Анализ научных разработок в рассматриваемой области исследований представлен широко, охвачены основные виды установок по выработке тепловой и электрической энергии, отмечены пути повышения экономичности котельных установок.

На основании анализа научных работ в исследуемой области сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

В качестве замечания по главе 1 необходимо отметить избыточно подробный для докторской диссертации материал по показателям тепловой экономичности ТЭС (например, стр. 40-44). Так, вывод известных расчетных выражений для определения удельных расходов условного топлива на отпуск электрической и тепловой энергии можно было не приводить без ущерба для целостности и смысловой нагрузки данного раздела.

В главе 2 диссертации приведены результаты экспериментальных исследований конденсационного теплообменника (КТ), смонтированного в газоходе за котлом ДЕ-10-14 ГМ Ульяновской ТЭЦ-3 и выполненного на базе биметаллического калорифера КСк-4-11-02 ХЛЗ. КТ предназначен для нагрева исходной воды перед подачей ее на химводоочистку путем охлаждения дымовых газов до температуры 43–47 °С (ниже точки росы, равной 55–56 °С). Установлено, что теплопроизводительность КТ составляет 0,48–0,52 МВт, расход конденсата водяных паров из дымовых газов 420–460 кг/ч, коэффициент теплопередачи КТ 48,1–60,1 Вт/(м²·К). Снижается содержание в уходящих газах после КТ оксидов азота на 27–29%, а количество водяных паров – на 40–50% вследствие их конденсации в КТ. Эффект от внедрения КТ при номинальной паропроизводительности котла составил 1,150 млн. руб/год в ценах 2018 г.

Предложены способы повышения температуры охлажденных в КТ продуктов сгорания при их отводе в окружающую среду с целью защиты дымовых труб от гидратной коррозии. Выполнена оценка снижения выбросов оксидов азота при использовании технологии охлаждения уходящих газов котлов.

Недостатком главы 2 является отсутствие рекомендаций по распространению рассматриваемой технологии глубокого охлаждения дымовых газов на энергетические котлы ТЭС: рассматриваемый котел ДЕ-10-14 ГМ к таковым не относится.

В главе 3 представлены результаты обобщения данных натуральных испытаний конденсационного теплоутилизатора, приведены методики тепловых расчетов конденсационных теплообменников контактного и поверхностного типов и результаты численных исследований теплообмена охлажденных в КТ продуктов сгорания, движущихся в газоотводящей трубе с прижимной футеровкой. Определены условия работы газоотводящих труб тепловых электростанций при отводе через них низкотемпературных продуктов сгорания, имеющих пониженное содержание водяных паров вследствие их частичной конденсации при охлаждении ниже точки росы в конденсационном теплообменнике. Даны рекомендации по обеспечению режимов работы, исключающих увлажнение и, как следствие, коррозионный износ внутренних поверхностей дымовых труб.

Теплоутилизационная установка, методики и программы теплотехнических расчетов на ПЭВМ конденсационных теплоутилизаторов поверхностного типа и процессов тепло- и массообмена при движении продуктов сгорания в газоотводящих трубах внедрены на Ульяновской ТЭЦ-3.

Необходимо отметить, что выполненный в разделе 3.5 анализ влияния технологии глубокого охлаждения дымовых газов на КПД котлов было бы целесообразным провести в строгом соответствии с нормативной методикой расчета КПД брутто котлов и его составляющих, изложенной в руководящих документах энергетической отрасли. Отмеченный автором недостаток нормативной методики, заключающийся в исчислении показателей от нижней теплоты сгорания на рабочую массу топлива легко преодолевается переходом к высшей теплоте сгорания.

В главе 4 приведено описание разработанных автором технических решений по использованию вторичных тепловых энергоресурсов в газифицированных котельных установках тепловых электростанций. Выполнен анализ влияния влагосодержания дутьевого воздуха и коэффициента избытка воздуха в уходящих газах котла на влагосодержание продуктов сгорания, поступающих в теплоутилизатор, а также температуры

отводимых из теплоутилизатора охлажденных продуктов сгорания на их влагосодержание после КТ. Результаты обобщены для котлов разной тепловой мощности.

Рассматривается схема котельной установки, в которой максимально используется теплота отводимых в атмосферу парогазовых потоков, что позволяет значительно повысить параметры работы КТ и уменьшить расход обрабатываемой на водоподготовительной установке воды. Предложена котельная установка, в которой предварительный подогрев дутьевого воздуха котла осуществляется уходящими газами с их охлаждением ниже точки росы водяных паров в поверхностном конденсационном теплообменнике.

На основании экспериментальных данных предложена методика определения потерь теплоносителя и теплоты с непрерывной продувкой котлов, произведена оценка влияния величины продувки на экономичность ТЭЦ. С целью повышения надежности и экономичности работы барабанных котлов предложены способы совершенствования процесса непрерывной продувки котловой воды. Произведена оценка влияния величины непрерывной продувки котлов на экономичность Безымянской ТЭЦ и Саранской ТЭЦ-2. Результаты приняты к внедрению на Безымянской и Самарской ТЭЦ.

Приведены результаты численного эксперимента и дана оценка экономической эффективности варианта расширения Самарской ТЭЦ котлом БКЗ-420-140 НГМ и устанавливаемым за ним конденсационным теплообменником.

Расчеты по определению финансовых потерь ТЭЦ, связанных с работой существующей схемы непрерывной продувки котлов, следует признать корректными. Однако оценка уменьшения этих потерь за счет изменения схемы утилизации теплоты продувочной воды (например, стр. 169-170) не учитывает изменение показателей работы прочего, кроме собственно схемы продувки котлов, оборудования. Так, использование продувки для дополнительного подогрева какой-либо «полезной» воды в цикле ТЭС приведет к перераспределению тепловых нагрузок между источниками теплоты. Если при существующей схеме для подогрева этой «полезной» воды использовался пар теплофикационных отборов турбин, то при переходе к предлагаемой новой схеме утилизации теплоты продувочной воды эти отборы будут разгружаться с соответствующим уменьшением доли выработки электроэнергии на тепловом потреблении, а значит и с увеличением удельных расходов топлива. Это же касается и обсуждаемых в работе эффектов при уменьшении или увеличении собственно расхода продувочной воды котлов.

Глава 5 посвящена анализу экспериментальных данных о влиянии коэффициента избытка воздуха в уходящих газах α_{yx} на КПД энергетических котлов и потерь энергии при дросселировании водяного пара в редуцированных установках (на примере ООО «Самараоргсинтез»). Представлены результаты расчетов по определению зависимостей КПД котлов от α_{yx} . Установлено, что при увеличении паропроизводительности котла влияние повышения α_{yx} на снижение КПД котла уменьшается. Разработаны рекомендации по повышению надежности работы энергетических котлов ТЭЦ, котельных установок и систем парового теплоснабжения ООО «Самараоргсинтез».

В качестве замечаний по главе 5 необходимо отметить следующее:

– в пояснениях в формуле (5.1), а также в п. 5.4 параметр $t_{хв}$ определен как «температура холодного воздуха на входе в воздухоподогреватель». Однако в действительности $t_{хв}$ – температура холодного воздуха на стороне всасывания дутьевого вентилятора до врезки линии рециркуляции горячего воздуха. Температура воздуха перед воздухоподогревателем отличается от неё минимум на величину нагрева воздуха в дутьевом вентиляторе (а дополнительно, при наличии соответствующих средств предварительного подогрева, – на нагрев воздуха в теплом ящике (шатре) котла, в паровых калориферах, а также за счет рециркуляции горячего воздуха);

– формула (5.4) даже при заявленном отсутствии химического недожога топлива является не вполне корректной: в числителе необходимо указывать разность $(21 - \rho C_{O_2})$, где для природного газа $\rho = 0,1$.

Глава 6 посвящена анализу режимов работы и разработке научно обоснованных технических решений по совершенствованию конструкций вакуумного деаэрата типа ДВ-800 ст. № 5 Самарской ТЭЦ и вакуумно-кавитационного деаэрата Центральной отопительной котельной (ЦОК) Самарской ГРЭС. Представлены результаты натурных испытаний вакуумного деаэрата ДВ-800 ст. № 5 Самарской ТЭЦ после проведения реконструкции. Получены новые результаты, которые подтверждают эффективность проведенной реконструкции и показывают возможность повышения производительности горизонтальных деаэраторов типа ДВ-800 выше 100% (по данным испытаний до 137,5%) номинальной нагрузки при соблюдении требуемого нормативного качества подпиточной воды.

Предложены новые разработки по повышению интенсивности процесса десорбции газов из подпиточной воды посредством вакуумно-кавитационных деаэраторов ЦОК Самарской ГРЭС. Установлено, что средние значения концентраций растворенного кислорода в деаэрированной воде составляют: 5,9; 5,0; 29,7; 11,75 мкг/дм³ соответственно для деаэрата ст. № 1, 2, 3, 4, что указывает на сравнительно высокое качество дегазации обрабатываемой воды. Представленные в шестой главе диссертации разработки внедрены на Самарской ТЭЦ и приняты к внедрению на Самарской ГРЭС филиала «Самарский» ПАО «Т Плюс».

В качестве замечания по главе 6 необходимо отметить следующее. Автор констатирует низкую дегазационную эффективность деаэрата ДВ-800 ст. № 5 Самарской ТЭЦ (стр. 249), но никак не раскрывает хотя бы гипотетические причины этого ухудшения. Не ясно, при каких условиях построена зависимость, представленная на рис. 6.2, ведь эффективность деаэрации в вакуумном деаэрате определяется не только расходом исходной (химочищенной) воды, но и значениями целого ряда других режимных параметров. Сложная система корреляций между режимными параметрами работы вакуумных деаэраторов рассматриваемой серии изложена, к примеру, в работах профессора В.И. Шарапова.

В главе 7 рассматриваются способы и схемы утилизации теплоты подогретого воздуха газоотводящих труб ТЭС с вентилируемым воздушным каналом. Проведено численное моделирование процессов теплообмена продуктов сгорания и воздуха, движущихся в газоотводящей трубе с вентилируемым воздушным каналом, для различных режимов работы трубы. Рассмотрены две схемы утилизации теплоты подогретого воз-

духа: 1) воздух из канала трубы направляется в котельный агрегат для горения топлива; 2) рециркуляция воздуха в канале. Представлены результаты расчетов, выполненных для дымовой трубы Самарской ТЭЦ высотой 240 м. Предложенные решения представляют научный и практический интерес.

В главе 8 диссертации приведены решения, направленные на повышение экономичности ТЭЦ путем регенерации теплоты отработавшего в турбине водяного пара, отвода уходящих газов котла-утилизатора ГТУ в атмосферу через вытяжную башню градирни и промперегрева водяного пара двухконтурной парогазовой установки. Разработаны методики теплотехнических расчетов оборудования и тепломассообменных процессов применительно к предложенным способам повышения экономичности ТЭЦ, выполнены вариантные расчеты.

По материалу главы 8 имеются следующие вопросы и замечания:

– *каким образом воздух из вытяжной башни градирни будет транспортироваться в котел? На схеме рис. 8.1 отсутствует соответствующий вентилятор; очевидно, при этом должны измениться затраты электроэнергии на собственные нужды, а значит и КПД нетто ТЭС. Кроме того, этот воздух планируется подавать на вход в воздухоподогреватель котла или же непосредственно в топку? В первом случае следовало бы учесть повышение температуры уходящих газов либо равноценное уменьшение нагрузки средств предварительного подогрева дутьевого воздуха (паровых калориферов, например), а во втором случае – изменение условий в зоне горения топлива;*

– *воздухоподогревательную установку по схеме 8.2 автор предлагает разместить в котельном отделении, при этом, судя по рис. 8.4, расход циркуляционной воды из турбинного отделения на эту установку достигает 360 т/ч на один котел или 1800 т/ч на пять установленных на ТЭЦ котлов. В выполненной автором оценке экономического эффекта при этом не учтены затраты на дополнительные трубопроводы, а также их гидравлическое сопротивление с соответствующим увеличением мощности насосов на потоке направляемой в котельное отделение воды;*

– *эффективность предложенного технического решения для ПГУ-У иллюстрируется для ПГУ-170 и ПГУ-450 при их работе в номинальном режиме; следовало бы рассмотреть работу ПГУ и при частичных нагрузках, а также при различных температурах наружного воздуха.*

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, в полной мере отражающие содержание диссертации.

Научная новизна диссертации состоит в разработке новых научно обоснованных технических и технологических решений и применяемых для их обоснования математических моделей и методик расчета, обеспечивающих:

– *повышение эффективности котельных установок тепловых электростанций за счет утилизации теплоты уходящих продуктов сгорания, горячего воздуха вентилируемых дымовых труб, снижения потерь теплоты с непрерывной продувкой барабанных котлов, предварительного подогрева дутьевого воздуха котлов теплотой конденсации отработавшего в турбине водяного пара;*

– совершенствование эксплуатационных режимов и массообменных характеристик вакуумного струйно-барботажного горизонтального деаэрата типа ДВ-800 конструкции НПО ЦКТИ-СЗЭМ и вакуумно-кавитационного деаэрата конструкции СамГТУ;

– повышение показателей тепловой экономичности парогазовых ТЭС путем отвода уходящих газов котла-утилизатора газотурбинной установки в атмосферу через вытяжную башню градирни, промежуточного перегрева водяного пара в двухконтурном котле-утилизаторе.

Практическую значимость диссертации составляют подробно изложенные методики расчета технических и технико-экономических параметров объектов исследования при использовании в них разработанных новых технических и технологических решений, обеспечивающие возможность непосредственного использования этих решений при проектировании, реконструкции и модернизации ТЭС различного типа и их отдельных технологических систем, а также практические рекомендации по эффективной реализации рассматриваемых технических решений с учетом конкретных условий.

Высокая практическая значимость работы подтверждается тем, что ее результаты внедрены на промышленных предприятиях Российской Федерации или приняты к внедрению со значительным экономическим эффектом (более 192 млн. рублей в год в ценах 2020 г.): на Ульяновской ТЭЦ-3, Самарской ТЭЦ, Центральной отопительной котельной Самарской ГРЭС, Безымянской ТЭЦ.

Соответствие паспорту научной специальности

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты»:

- *в части формулы специальности* – «...работы по совершенствованию действующих и обоснованию новых типов и конструкций основного и вспомогательного оборудования тепловых электрических станций»;

- *в части области исследования:*

- пункту 1: «Разработка научных основ методов расчета, выбора и оптимизации параметров, ... , систем и тепловых электростанций в целом»;

- пункту 2: «Исследование и математическое моделирование процессов, протекающих в агрегатах, системах и общем цикле тепловых электростанций»;

- пункту 4: «Разработка конструкций теплового и вспомогательного оборудования и компьютерных технологий их проектирования и диагностирования».

Замечания и вопросы по диссертации

Кроме замечаний и вопросов, указанных при анализе содержания диссертации, необходимо отметить наличие частных замечаний по оформлению рукописи диссертации:

а) на рис. 1.4 (стр. 40) представлена тепловая схема КЭС, на которой арабскими цифрами указаны точки 1, 2, 3, 4, 5, 6. При этом отсутствует пояснение: для чего они приведены и что обозначают?

б) формулы для расчета X_{yx}' и X_{yx}'' записаны дважды под номерами (2.3), (2.4) на стр. 79, а затем еще и под номерами (4.2), (4.3) на стр. 152; аналогично, формула для расчета среднего температурного напора Δt_{cp} приведена на стр. 82 под номером (2.12) и на стр. 315 под номером (8.10);

в) вряд ли обосновано приведение значений расчетных расходов теплоносителя или тепловой мощности потоков с точностью до 3-5 знаков после запятой (см. например табл. 4.6);

г) многократно указаны «концентрация кислорода» или «концентрация диоксида углерода» вместо соответственно «концентрация растворенного кислорода» и «концентрация свободного диоксида углерода».

Общая оценка диссертации

Наличие указанных частных замечаний не меняет общей положительной оценки диссертации. Диссертация содержит комплекс новых научно обоснованных технических и технологических решений, внедрение которых обеспечивает существенное повышение показателей эффективности котельных установок ТЭС за счет использования вторичных энергоресурсов. Значимость рассматриваемой проблемы для экономики страны в целом обусловлена тем, что сформулированные в работе задачи имеют общесистемный характер, а результаты их решения тиражируемы в высокой степени. Диссертация обладает научной новизной.

Автореферат отражает основное содержание диссертации. Диссертация и автореферат написаны в доказательном стиле с использованием терминологии, принятой в рассматриваемой отрасли науки и техники, обладают внутренним единством содержания и раскрывают положения, выносимые на защиту. Предложенные автором диссертации технические и технологические решения аргументированы и оценены по сравнению с другими известными решениями.

Публикации в открытой печати раскрывают сущность работы, количество публикаций по списку ВАК более чем удовлетворяет требования по докторским диссертациям: 120 печатных работ, в том числе 4 монографии и 5 учебных пособий, 12 статей в изданиях, индексируемых в международных базах Scopus и Web of Science, 36 статей в рецензируемых журналах по списку ВАК России, 32 патента на изобретения, одно свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. Кроме того, работа прошла апробацию на научно-технических конференциях и семинарах различного уровня.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация Зиганшиной Светланы Камиловны «Энергосбережение в котельных установках тепловых электрических станций за счет использования вторичных энергоресурсов» представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны новые научно обоснованные технические и технологические решения, обеспечивающие повышение эффективности работы котельных установок паротурбинных и парогазовых электростанций путем ис-

пользования вторичных тепловых энергоресурсов, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Диссертация соответствует требованиям пп. 9–11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации «О порядке присуждения ученых степеней» от 24 сентября 2013 г. № 842 в актуальной редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Зиганшина Светлана Камиловна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.14 «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты».

Официальный оппонент:

заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции»
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, доцент
153003, г. Иваново,
ул. Рабфаковская, д. 34
тел. (4932) 269-696, 269-931,
e-mail: admin@tes.ispu.ru,
<http://ispu.ru/>

Г.В. Ледуховский
17 мая 2021 г.

Ледуховский
Григорий Васильевич

Подпись Ледуховского Г.В. заверяю:

Учёный секретарь Учёного совета
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново,
ул. Рабфаковская, д. 34
тел. (4932) 269-696, 269-931



Ширяева
Ольга Алексеевна