

ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора технических наук, ведущего научного
сотрудника ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
г. Новосибирск, заведующего кафедрой теплоэнергетики Института энергетики
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени

Т.Ф. Горбачева» г. Кемерово

Богомолова Александра Романовича

на диссертационную работу Цибульского Святослава Анатольевича по теме
**«Совершенствование тепловой схемы утилизационной парогазовой
установки с целью повышения эффективности генерации электрической
энергии»**,

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальностям 05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические
системы и агрегаты

Актуальность темы диссертации.

Поставленная задача повышения эффективности утилизационных парогазовых установок (ПГУ) с циклами на трех рабочих телах, где верхний цикл газотурбинной установки (ГТУ) работает на смеси воздуха и продуктов сгорания газа, средний цикл ПГУ работает на водяном паре, а нижний цикл ПГУ работает на органическом рабочем теле (ОРТ), при этом конденсация ОРТ производится в воздушном конденсаторе (ВК), является актуальной в условиях пониженных среднегодовых температур окружающей среды в отдаленных северных районах прохождения нефтегазовых магистралей.

Как известно из термодинамики, главными факторами повышения КПД циклов являются повышение температуры подвода тепла и снижение температуры отвода тепла. Повышение температуры подвода тепла определяется конструкционными материалами, из которых изготавливают установки, и совершенствованием систем их охлаждения. Снижение температуры отвода тепла влияет на КПД цикла значительно сильнее, чем повышение температуры подвода тепла, но в ГТУ оно ограничено процессом в газовой турбине, а в ПГУ – температурой охлаждающей среды в конденсаторе. Поэтому, наиболее высокие КПД в настоящее время получены в утилизационной ПГУ бинарного типа, где объединены два цикла – цикл ГТУ, в котором рабочим телом являются смесь воздуха и продуктов сгорания углеводородного топлива, и цикл ПГУ, где рабочим телом является вода.

В настоящее время существует несколько основных направлений повышения эффективности генерации энергии с применением ПГУ. Существуют технические решения по снижению температуры воздуха на входе в компрессор с целью уменьшения зависимости технико-экономических параметров газотурбинной и парогазовых установок от условий окружающей

среды. Также предлагается применение в ПГУ внутрицикловой газификации угля и биомассы, и сжигания синтез-газа с применением устройств улавливания CO и CO₂ из уходящих газов, однако стоимость строительства данных парогазовых установок возрастает до 3000÷5500 \$/кВт. Другим известным способом повышения КПД парогазовой установки является повышение начальной температуры газов ГТУ. Наиболее очевидным решением задачи повышения КПД является решение по оптимизации котла – утилизатора с целью максимально возможного использования тепла выхлопных газов ГТУ в паротурбинном цикле. С целью достижения максимального коэффициента использования топлива предлагаются схемы когенерационных ПГУ, в которых генерируется электроэнергия, тепло и холод с возможностью использования такой установки в вододефицитных районах совместно с воздушным конденсатором. Наиболее близким техническим решением являются тепловые схемы ПГУ с циклом ПТУ, работающем на органическом цикле Ренкина. В современной парогазовой установке утилизационного типа низкопотенциальная часть состоит из паротурбинной установки, работающей на водяном паре. Однако вода имеет ряд недостатков, связанных с температурой замерзания при 0 °С, которая не позволит отводить тепло от цикла ниже данного значения. В диссертации Цибульского С.А. предлагается использовать два цикла Ренкина. Первый цикл Ренкина работает на водяном паре и предназначен для утилизации тепла выхлопных газов ГТУ при температуре 400÷650 °С, и второй цикл – органический цикл Ренкина, работающий на ОРТ, способный утилизировать и полезно использовать отработанное тепло от цикла на водяном паре и тепло охлажденных выхлопных газов ГТУ в КУ в диапазоне температур 150÷350 °С. Таким образом, автором предлагается оптимальная схема взаимодействия между двумя циклами и поиск решения отвода тепла в нижнем цикле при низких температурах с целью повышения КПД парогазовой установки.

Результаты такого рода исследований, несомненно, будут востребованы, т.к. наиболее перспективным в настоящее время направлением совершенствования парогазовых установок является снижение температуры отвода теплоты в цикле за счет применения ОРТ.

Следует отметить, что диссертация С.А. Цибульского по основным отличительным признакам (цель, задачи, методы исследования, защищаемые положения, результаты, ориентация на решение практических задач теплоэнергетики) соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» (перечень этих направлений утвержден Указом Президента РФ 07 июля 2011г. N 899).

Общая методология и методика исследования.

Диссертационная работа С.А. Цибульского изложена на 120 страницах, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и пяти приложений на 29 страницах. В работе процитировано 191 литературных

источников (как отечественных, так и зарубежных), что свидетельствует о хорошей проработке диссертантом научной литературы по теме работы.

Работа С.А. Цибульского является расчетно-теоретической по существу. Автор выполнил теоретические обобщения по результатам анализа режимных и параметрических характеристик действующих энергоблоков при выполнении диссертационного исследования. В работе С.А. Цибульский использует численные методы исследования с помощью разработанных методик расчета. При разработке методик расчета применены методы материальных и тепловых балансов систем и элементов и методы тепло- и массообмена в ВК и оборудовании утилизационной ПГУ. Оценка погрешности расчетов произведена с использованием теории приближенных вычислений и случайной вариации исходных параметров.

В работе С.А. Цибульского произведен теоретический анализ по обоснованию тепловой эффективности ПГУ с циклами на трех рабочих телах. Выведено уравнение, позволяющее оценить КПД такой ПГУ и определить пути ее совершенствования. На основе методики расчета разработана программа расчета схем ПГУ. С помощью методики расчета ВК проведены исследования процесса конденсации ряда ОРТ в секции ВК в зависимости от скорости воздуха в межтрубном пучке и температуры охлаждающего воздуха на входе в конденсатор. На основе методики расчета системы ПГУ–ВК составлена программа, по которой проведены расчеты и получены зависимости КПД и мощности ПГУ, электрической мощности ЦНД от температуры охлаждающего воздуха.

Научная новизна полученных результатов. Наибольшее значение для науки (и практики в будущем) имеют результаты расчетно-теоретических исследований С.А. Цибульского и сформулированные после их анализа и обобщения выводы:

1. Выведено уравнение взаимосвязи КПД ПГУ с циклами на трех рабочих телах от КПД циклов и КПД связывающих эти циклы элементов.

2. Разработаны оригинальные методики расчета двух тепловых схем утилизационной ПГУ с циклами на трех рабочих телах, отличающиеся способом подогрева конденсата ОРТ перед экономайзером низкого давления – рециркуляцией конденсата и регенеративным подогревом конденсата в смешивающем подогревателе. Показано, что регенеративный подогрев конденсата в смешивающем подогревателе более эффективен.

3. С учетом последних исследований по теплообмену в оребренном трубном пучке разработана методика расчета ВК для исследования конденсации в нем разных видов органических рабочих тел.

4. Впервые разработана методика расчета комплекса ПГУ-ВК, которая позволила провести параметрические исследования с изменением режимных параметров ВК и циклов ПГУ, а также определить наиболее эффективное ОРТ.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Работа С.А. Цибульского является расчетно-теоретической. Автор использовал традиционные методики. Полученные результаты не противоречат существующим базовым физическим законами и уравнениями термодинамики, которые описываются в работе основными уравнениями материальных и тепловых балансов, тепло- и массопередачи в элементах ВК, котле-утилизаторе (КУ), турбинах, испарителе ОРТ и прочих теплообменных аппаратах. Автор применяет апробированные и хорошо зарекомендовавшие методики расчета газотурбинной и паротурбинной установок, работающих на водяном паре и ОРТ. Оценка погрешности расчетов произведена с использованием теории приближенных вычислений и случайной вариации исходных параметров.

Практическая значимость.

Диссертационное исследование С.А. Цибульского представляет в части результатов, выводов и защищаемых положений материал, безусловно, необходимый для проведения опытно-конструкторских работ по повышению КПД утилизационной ПГУ.

Программный продукт, реализующий методику расчета воздушного конденсатора, предназначен для проектирования промышленных воздушно-конденсационных установок и может быть использован учебными, научными, промышленными и проектными организациями. Методика и программа расчета системы ПГУ-ВК, позволяет проводить комплексные параметрические исследования изменения характеристик ВК и ПГУ в зависимости от режимных параметров теплоносителей и окружающего воздуха.

Практическая значимость результатов работы подтверждена заключением «Дальневосточной генерирующей компании» филиала «Приморской генерации».

Замечания по диссертационной работе

1. Автор в диссертационной работе на рис. 6 и 7 неграмотно привел принципиальные тепловые схемы ПГУ с циклами на трех рабочих телах, имеющих один электрогенератор на три цикла.

2. В параграфе 3.1 автор принял температуру уходящих газов после котла-утилизатора 100°C. Некорректно принимать понижение температуры уходящих газов ниже 135-150°C, во избежание достижения температуры точки росы на теплообменной поверхности, и как следствие, предотвращение коррозии этих труб.

3. На стр. 62 автор работы приводит данные, что экономайзер низкого давления позволяет снизить температуру уходящих газов с 192 °С до 100 °С и тем самым повысить КПД КУ с 72,0 до 86,5 %. Необходимо представить расчет по изменению обобщающего КПД ГТУ, включающего выработку электрической энергии и утилизацию теплоты в КУ.

4. В литературе освещены вопросы качественного влияния повышения давления на входе в турбину и понижения давления на выходе из турбины. Автору работы следует привести формулы для определения численных значений КПД ПГУ от указанных давлений, приведенных на рис. 16.

5. В табл. 4 (с. 63) представлены результаты расчетов технико-экономических показателей работы ПГУ с циклами на трех рабочих телах в зависимости от начального давления водяного пара с нижним циклом на R365mfc. При этом, $\eta_{э_ОРТ}$ – электрический КПД цикла ОРТ, остается неизменным: по схема ПГУ с регенеративным подогревом ОРТ – 19,02%, по схеме ПГУ с рециркуляцией ОРТ перед КУ – 17,99%. Следует пояснить неизменность $\eta_{э_ОРТ}$ при повышении начального давления водяного пара и что является причиной низкого значения $\eta_{э_ОРТ}$.

6. Автору работы необходимо показать идеальный цикл Ренкина на органическом рабочем теле R365mfc для одного из реализуемого условия в представленных расчетах и определить $\eta_{э_ОРТ}$ нетто (за вычетом затрат эл. энергии на перекачку жидкого рабочего тела в цикле с ОРТ и на подачу воздуха на охлаждение ОРТ в конденсаторе).

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Заключение

Несмотря на приведенные замечания, диссертация Цибульского Святослава Анатольевича соответствует специальностям 05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты, имеет внутреннее единство и является завершённой научно-квалификационной работой, в которой, на основании выполненных автором исследований изложены научно обоснованные технические разработки, представляющие интерес в области повышения КПД парогенераторных и газотурбинных установок. Предложена утилизационная ПГУ с циклами на трех рабочих телах и конденсацией ОРТ в воздушном конденсаторе. Полученные результаты имеют существенное значение для развития страны, в решении задач энергетической стратегии РФ.

Диссертация соответствует требованиям п.9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 21.04. 2016 г. №335) ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а её автор Цибульский Святослав Анатольевич достоин присуждения учёной степени кандидата технических наук.

Официальный оппонент,
доктор технических наук,
(специальность 01.04.14 - «Теплофизика и теоретическая теплотехника»),
ведущий научный сотрудник ФГБУН
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, г. Новосибирск.

Заведующий кафедрой теплоэнергетики Института энергетики
ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени
Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово

Богомолов Александр Романович

Подпись заверяю

Адрес: Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, д.1.
650000, Кемерово, ул. Весенняя, д.28

E-mail: barom@kuzstu.ru

тел. +79235170303

Россия, 630090, г. Новосибирск,
проспект Академика Лаврентьева, д. 1.

ТЕЛ.: +7(383) 330-90-40

ФАКС: +7(383) 330-84-80

E-mail: director@itp.nsc.ru

Web: <http://www.itp.nsc.ru>

Россия, 650000, Кемерово, ул.
Весенняя, д.28

ТЕЛ.: +7(3842) 68-23-14

ФАКС: +7(3842) 39-69-60

E-mail: rector@kuzstu.ru

Web: <https://www.kuzstu.ru>

Подпись Богомолова
Членский секретарь Куз

И.И. Соколова