

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук Комарова Ивана Игоревича на диссертацию Крылова Виктора Сергеевича «Экспериментальное исследование процессов теплообмена при конденсации водяного пара из смеси с высоким содержанием неконденсирующихся газов и разработка на этой основе высокоэффективного конденсатора», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.7 – «Турбомашины и поршневые двигатели»

Актуальность темы диссертации. Ключевой задачей современной энергетики является поиск прогрессивных технологий для обеспечения дальнейшего повышения эффективности энергетического комплекса России за счет создания новых и совершенствования существующих энергоустановок. К данной категории относятся высокотемпературные газопаровые энергетические установки, внедрение которых способно повысить электрический КПД при разумных капитальных затратах, а также энергетические комплексы на базе полужамкнутого газового цикла на сверхкритическом диоксиде углерода (в основе так называемый «Цикл Аллама»). В обоих случаях практическая реализация данных установок требует разработки эффективных конденсаторов водяного пара из смеси, в которой содержится высокая концентрация неконденсирующихся газов. В этой связи выполненные автором исследования по разработке методики расчета высокоэффективных конденсаторов пара из движущейся парогазовой смеси на базе экспериментальных исследований являются актуальными.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации. В своей работе автор применяет известные зависимости и методики для обработки экспериментальных данных, использует поверенные приборы измерения, которое соответствует требованиям точности эксперимента, использует экспериментальные установки, возможности которых адекватны поставленным

экспериментальным задачам. В работе уделяется большое внимание оценке погрешности измерений и установлению доверительных интервалов значений определяемых величин. Итоги исследований были представлены на многих конференциях, результаты расчетов и экспериментов согласуются между собой. Это позволяет считать результаты диссертационной работы вполне обоснованными и достоверными.

Научная новизна результатов исследования. Автором получены новые экспериментальные данные о процессе конденсации водяного пара из движущейся смеси газов с высокой объемной долей неконденсирующихся газов на поверхностях охлаждаемых труб. Установлены зависимости коэффициента теплоотдачи от пара к стенке для различных значений объемной доли неконденсирующихся газов, на основе которых удалось определить оптимальные по критерию минимальной площади поверхности теплообмена в конденсаторе значения конструктивных (длина трубы), теплогидравлических параметров контура охлаждения (температура охлаждающей воды, скорость охлаждающей воды) и напора парогазовой смеси в конденсаторе.

Полученные научные результаты позволили составить методику расчета высокоэффективного конденсатора пара из движущейся парогазовой смеси, которая учитывает важные теплогидравлические и массообменные процессы – возникновение дополнительного препятствия на пути конденсации пара помимо пленки конденсата, заключающегося в сопротивлении диффузии пара со стороны слоя неконденсирующихся газов, изменение парциального давления пара по мере конденсации пара и нарастания гидравлических потерь при движении ПГС через ряды пучков труб. Предложенный принцип построения высокоэффективного конденсатора пара, предусматривающий поддержание постоянной скорости ПГС себя оправдал по итогам выполненных испытаний экспериментального образца ВЭК.

Все вышеизложенное позволяет сделать вывод о наличии в работе новых научных результатов, имеющих важное значение для развития теории и практики создания эффективной конденсаторной техники.

Теоретическая значимость результатов исследования. Автор уделяет большое внимание особенностям конденсации пара из движущейся парогазовой смеси, теоретически обосновывает, анализирует и обобщает полученные данные. Результаты выполненных исследований вносят значительный вклад в понимание процессов тепломассообмена при эксплуатации конденсаторов паротурбинных установок с высокой концентрацией неконденсирующихся газов.

Практическая значимость результатов исследования. Проведенные автором исследования являются необходимой научно-технической основой для повышения на практике эффективности конденсационных аппаратов для работы на парогазовой смеси. Авторские методики расчета могут быть применены для совершенствования существующих и проектирования новых конденсаторов водяного пара, в т.ч. для перспективных высокотемпературных энергоустановок на газопаровых рабочих телах.

Оценка содержания диссертации и автореферата.

Диссертация включает в себя введение, четыре главы и заключение.

Во введении автором полностью раскрыты актуальность, цель, задачи выполненного исследования, обозначены научная новизна и результаты диссертационной работы.

Первая глава представляет собой обзор литературы по особенностям конденсации пара из парогазовой смеси. Обзор структурирован, включает в себя необходимые формулы и графики. Материалы главы в полной мере обосновывают цели и задачи исследования.

Во второй главе приводится схема экспериментальной установки для исследования коэффициентов теплоотдачи при конденсации пара из парогазовой смеси, описание её устройства в целом и отдельных узлов. Изложены методики проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных.

Третья глава посвящена описанию методики расчета высокоэффективного конденсатора пара с большим содержанием неконденсирующихся газов.

Выполнены расчеты оптимальной скорости пара при изменении ключевых теплогидравлических параметров (динамический напор, температура и скорость движения охлаждающей воды, длина труб, концентрация НКГ).

В четвертой главе приводятся результаты экспериментального исследования по определению среднего коэффициента теплопередачи по секциям изготовленного модуля высокоэффективного конденсатора пара. Описаны методики проведения экспериментов и обработки экспериментальных данных.

Автором в ходе обобщения комплекса полученных расчетно-экспериментальных данных был разработан и представлен в диссертации вариант конструктивного исполнения конденсатора, конструктивным прототипом для которого стал модуль высокоэффективного конденсатора пара.

Закключение соответствует полученным результатам.

Автореферат диссертации в объеме основных выводов и описанных научных результатов полностью соответствует содержанию диссертации.

Апробация

Автор представлял к обсуждению доклады по результатам исследований на 9 всероссийских и международных научных конференциях. Итоги работы опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, а также в базах SCOPUS и РИНЦ. Это позволяет говорить о хорошем уровне апробации положений диссертационного исследования, выносимых на защиту.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация Крылова В.С. «Экспериментальное исследование процессов теплообмена при конденсации водяного пара из смеси с высоким содержанием неконденсирующихся газов и разработка на этой основе высокоэффективного конденсатора» соответствует паспорту научной специальности 2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели (технические науки) в части пункта 2: Разработка физико-математических моделей, пакетов прикладных программ, цифровых двойников, методов экспериментальных исследований с целью

повышения эффективности, надежности и экологичности рабочих процессов турбомашин, поршневых двигателей, их систем и вспомогательного оборудования в составе объектов применения.

Замечания по диссертации:

1. В описании теоретической значимости работы указано, что выводы работы могут быть использованы при проектировании установок, работающих по циклу Аллама и ОИВТ РАН. В энергетической установке на базе цикла Аллама массовая доля водяного пара в выхлопе турбины невелика и составляет примерно 6-8 %. Остальное – преимущественно диоксид углерода. В этой связи возникает вопрос – насколько применимы результаты выполненных исследований к этой установке с учетом того, что в работе в объеме полученных экспериментальных данных максимальная объемная доля НКГ составляла 18 %.

2. Изменяются ли выводы по работе и полученные результаты в случае замены воздуха, для которого получены экспериментальные данные, на диоксид углерода – основной неконденсирующийся компонент рабочего тела в газопаровых энергетических установках (гибридных ПТУ с внешним метан-кислородным перегревом пара и энергоустановках на сверхкритическом CO_2) и если да, то каким образом?

3. На каком основании на стр. 71 сделан вывод о том, что полученные результаты могут быть экстраполированы на область до $V \rightarrow 1$, если в работе максимальное значение V , для которого получены данные, составляет 18 %?

4. Не совсем понятен смысл рис. 18. Автору стоило бы привести дополнительные пояснения по данному графику. Необходимо ли его строить от нуля по оси ординат (в таком масштабе кажется, что между аргументом и функцией нет никакой значимой взаимосвязи)? Не ясно как была получена формула 2.15?

5. На графиках рисунка 21 последовательно показано однофакторное влияние 5 параметров на оптимальную скорость. Значение 4 из 5 параметров для каждого графика заданы в соответствии с базовым вариантом на стр. 83. Но при этом не приводятся обоснования выбора данных значений. Может ли изменение значений данных параметров повлиять на характер и положение кривых на рисунке 21, в какой мере это может повлиять на выводы по значению оптимальной скорости?

6. В выводах по третьему разделу (стр. 87) указано, что Методика определяет размеры парового канала, сечение которого уменьшается по мере конденсации пара из парогазовой смеси. При этом в самой главе не приводятся никаких рекомендаций для выбора числа рядов труб, угла (углов) образующих конфузорного канала конденсатора, длины рабочего объема конденсатора. Возможно такие рекомендации стоило бы привести в привязке к доле НКГ в смеси газов.

7. В работе есть неточности и описки. Например, на стр. 68 в таблице 5 температурный напор указан в кПа, следующая строчка значений не обозначена. В четвертом столбце расход воздуха указан с избыточной точностью, вызывает сомнение, что расходомер способен достоверно измерить расход 0,000001 кг/с. На стр. 83 скорость указана в м, длина в м/с, а концентрация в °С. На стр. 97 в таблице 9 число знаков после запятой для режима 19 выглядит избыточным.

Сделанные замечания не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы.

Диссертация Крылова В.С. является завершенной научно-квалификационной работой, обладающей внутренним единством и характеризующейся последовательным и хорошо структурированным изложением результатов выполнения задач исследования.

Заключение

Диссертация Крылова Виктора Сергеевича «Экспериментальное исследование процессов теплообмена при конденсации водяного пара из смеси с высоким содержанием неконденсирующихся газов и разработка на этой основе высокоэффективного конденсатора» удовлетворяет требованиям пунктов 9, 10, 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства российской Федерации от 24.09.2013 г. (ред. от 25.01.2024 г.) № 842.

Диссертационное исследование характеризуется высоким уровнем актуальности, обладает несомненной научной новизной и имеет большое практическое значение. В связи с вышесказанным считаю, что Крылов Виктор Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.7. Турбомашины и поршневые двигатели.

Официальный оппонент

доктор технических наук,
проректор по науке и инновациям
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»
Комаров Иван Игоревич.



02 июня 2025 г.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»)

Российская Федерация, 111250, г. Москва, Красноказарменная улица, дом 14, стр. 1.

Телефон: +7 495 362 77 22

E-mail: KomarovII@mpei.ru