

## ОТЗЫВ

### официального оппонента

**доктора технических наук Мингалеевой Гузель Рашидовны  
на диссертационную работы Петровой Надежды Павловны**  
«Интенсификация конвективного теплообмена в каналах калорифера переменного сечения с использованием наложенных пульсаций потока»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6 – Теоретическая и прикладная теплотехника.

#### **Актуальность темы.**

В настоящее время особое внимание уделяется повышению эффективности теплообменного оборудования, снижению затрат на его изготовление и эксплуатацию. В представленной диссертационной работе Петровой Н.П. рассмотрен процесс теплообмена в широко распространенных устройствах – калориферах, предназначенных для нагрева воздуха. Для данного вида оборудования обоснованно выбран комбинированный способ интенсификации теплообмена за счет использования каналов переменного сечения и наложения пульсаций потока.

Известно, что градиент давления в каналах переменного сечения оказывает значительное влияние на интенсивность теплообмена в турбулентном пограничном слое. При этом в зависимости от знака градиента давления влияние оказывается различным, а при наличии дополнительных воздействий (переменной степени турбулентности, пульсаций потока и т.д.) является достаточно мало изученным методом управления интенсивностью теплообмена.

Таким образом, в диссертационной работе Петровой Надежды Павловны «Интенсификация конвективного теплообмена в каналах калорифера переменного сечения с использованием наложенных пульсаций потока» на основе численного моделирования решается актуальная научно-практическая задача: интенсификация теплообмена в каналах калориферов с использованием гибридного совмещения наложенных пульсаций потока и знакопеременного градиента давления. Метод повышения эффективности

теплообмена в каналах калорифера за счет данных воздействий (градиента давления и пульсаций) не требует особого усложнения технологии изготовления оборудования, что существенно повышает его применимость. Необходимо отметить, что для калориферов, используемых для подогрева воздуха, подаваемого в котел, характерна работа в переходном режиме  $Re_d=3000...6000$ . При изучении теплообмена в каналах калорифера автором работы Петровой Н.П. в качестве метода исследования применено численное моделирование, позволяющее снизить затраты на проведение экспериментальных исследований. Следует отметить, что разработанные оригинальные решения, полученные в результате работы автора, защищены патентами РФ на изобретения и полезную модель (патент на изобретение RU №2784163 от 23.11.2022, RU №2794711 от 24.04.2023 и патент на полезную модель RU №21254 от 08.07.2022). Доклад по результатам работы, сделанный на 3 Всероссийской научно-практической конференции «Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации», отмечен дипломом 2 степени.

### **Структура и содержание диссертационной работы**

Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы из 114 наименований и 3 приложений. Объем диссертации с приложениями - 142 страницы.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, поставлены цель и задачи исследования, описана структура работы.

**В первом разделе** проведён анализ состояния проблемы повышения эффективности калориферов, рассмотрены особенности тепломассообмена и газодинамики в каналах переменного сечения при наличии различных воздействий (вдув, отсос, лунок и тд.), выявлены недостатки при использовании продольного градиента для интенсификации теплообмена, показано, что на данном этапе в литературе отсутствуют данные по применению гибридного метода интенсификации теплообмена в каналах калориферов с использованием переменного сечения и одновременным



наложением пульсаций потока.

**Во втором разделе** представлен выбор метода исследования и его валидация. Математическое моделирование течения и теплообмена выполнено в программном комплексе Code\_Saturne с помощью RANS подхода. Математическая модель включает в себя дифференциальные уравнения: сохранения массы (уравнение неразрывности), сохранения энергии, состояния, сохранения количества движения (Навье-Стокса).

Для подтверждения адекватности получаемых результатов производилась валидация в несколько этапов. На первом этапе производится сравнение результатов численного исследования с данными эксперимента Э.Я. Эпик, на втором этапе – с уравнениями А. А. Жукаускаса и Ф.В. Василева. Проведенный анализ сеточной сходимости показал, что удовлетворительная точность результатов при минимальных затратах машинного времени для имеющейся задачи исследования достигается, если расчетная область составлена более, чем 0,78 млн. ячеек.

Соискателем предложен метод численного исследования теплообмена и газодинамики для каналов калориферов переменного сечения (конфузорно-диффузорных) с одновременным наложением пульсаций потока или использованием переменной степени турбулентности в уравнениях  $k-\omega$  SST модели турбулентности Ментера при  $Re_d=3000...6000$ .

**В третьем разделе** представлены результаты исследования влияния на теплообмен гибридного метода интенсификации на основе совместного воздействия продольного градиента давления, интенсивности турбулентности (постоянной и переменной), наложенных пульсаций потока, в том числе для различных конфигурацией каналов.

В результате исследований соискателя, представленных в третьем разделе выявлено, что теплогидравлическая эффективность по сравнению с прямым каналом ( $dp/dx=0$ ) понизилась для конфузора ( $dp/dx<0$ ) до 39% и повысилась для следующих каналов: для диффузора ( $dp/dx>0$ ) до 30%, для каналов с переменным продольным градиентом давления двух участков

( $dp/dx < 0$ ,  $dp/dx > 0$ ) до 17%, для четырех участков ( $dp/dx < 0$ ,  $dp/dx > 0$ ,  $dp/dx < 0$ ,  $dp/dx > 0$ ) до 32%, для двух участков ( $dp/dx > 0$ ,  $dp/dx < 0$ ) до 24%, для четырех участков ( $dp/dx > 0$ ,  $dp/dx < 0$ ,  $dp/dx > 0$ ,  $dp/dx < 0$ ) до 39%. Теплогидравлическая эффективность для проточного канала при гибридном методе интенсификации теплообмена на основе совместного влияния продольного градиента и наложенных пульсаций потока оказывается выше до 70 % в режиме ускорения и до 15% в режиме торможения, чем для аналогичного канала в стационарном режиме.

**В четвертом разделе** соискателем Петровой Н.П. на основании проведенных численных исследований предложены технические решения по интенсификации конвективного теплообмена (патенты на изобретения РФ №2784163, РФ №2794711, патент на полезную модель РФ №212154). При сравнении с существующими ранее разработками по интенсификации теплообмена (изобретения патент US 4420039 A, WO 2017085592 A1, US 2018363991 A, SU 1643922 A1, RU 2068167 C1) оригинальные методы соискателя оказываются существенно эффективнее (до 2 раз). На основе результатов исследований соискателя разработаны критериальные уравнения для каналов калориферов с использованием переменного сечения (конфузорно-диффузорных) с одновременным наложением пульсаций потока, на базе которых разработана новая методика расчета калориферов, работающих при переходном режиме с  $Re_d = 3000 - 6000$ . Так же приведена оценка экономического эффекта, определен срок окупаемости.

**В заключении** представлены основные результаты диссертационного исследования соискателя. В приложениях представлен акт внедрения полученных результатов в производственную деятельность ООО «НЕОВЕНТ» и в учебный процесс ФГБОУ ВО «СамГТУ».

**Обоснованность научных положений и достоверность полученных результатов.** Результаты работы подтверждаются сопоставлением результатов численного исследования с результатами экспериментальных



исследований других авторов, тестированием используемого для численного исследования свободного программного обеспечения, применением положений теории теплофизического эксперимента, теории подобия и положений теории тепломассообмена. Подлинность численных исследований обеспечивается применением метода математического моделирования (подтвержденного сравнением с экспериментальными исследованиями) процессов переноса, использованием апробированного программного обеспечения.

**Научной новизной обладают следующие результаты работы.**

1. Верифицированный метод численного исследования при переходном режиме теплообмена и газодинамики каналов калориферов с использованием переменного сечения (конфузорно-диффузорных) при тепловых граничных условиях 2-го рода, отличающийся одновременным наложением пульсаций потока или использованием переменной степени турбулентности в уравнениях  $k-\omega$ SST модели турбулентности Ментера.

2. Новые результаты по исследованию процессов газодинамики и теплообмена для каналов калориферов с использованием переменного сечения (конфузорно-диффузорных) с одновременным наложением пульсаций потока, на базе которых выявлены закономерности тепломассообменных процессов для исследованных каналов в переходном режиме.

3. Обобщающие критериальные уравнения для теплового и гидравлического расчета при проектировании каналов калориферов с использованием переменного сечения (конфузорно-диффузорных) с одновременным наложением пульсаций потока при  $Re_d=3000-6000$ , с коэффициентом ускоренности  $K=9,5 \cdot 10^{-6}-1,32 \cdot 10^{-5}$ , с формпараметром  $M_\phi=0,024-0,04$   $dP/dx>0$  и  $dP/dx<0$ , с  $Sh=0,029-0,29$ , позволяющие учитывать гибридное воздействие наложенных пульсаций потока (частоту, амплитуду и т.д.) и знакопеременного градиента давления (формпараметр, коэффициент ускоренности).

4. Новая конструкция теплообменной поверхности, способ интенсификации конвективного теплообмена в каналах калориферов с использованием гибридного метода интенсификации на основе совместного влияния наложенных пульсаций потока и знакопеременного градиента давления в каналах переменного сечения (конфузорно-диффузорных), позволяющие повысить интенсивность теплообмена до 2,7 раза.

#### **Значимость для науки и производства результатов, полученных автором диссертации**

Практическая значимость заключается в получении обобщающих критериальных уравнений для теплового и гидравлического расчета при проектировании каналов калориферов переменного сечения (конфузорно-диффузорных) с одновременным наложением пульсаций потока при  $Re_d=3000-6000$ , с коэффициентом ускоренности  $K=9,5 \cdot 10^{-6}-1,32 \cdot 10^{-5}$ , с формпараметром  $M_\phi=0,024-0,04$   $dP/dx>0$  и  $dP/dx<0$ , с  $Sh=0,029-0,29$ , а также разработки новой конструкции теплообменной поверхности и способа интенсификации конвективного теплообмена. Разработанная конвективная теплообменная поверхность, способ интенсификации конвективного теплообмена и обобщающие критериальные уравнения используются в учебном процессе в «Самарском государственном техническом университете» для исследования работы теплообменного оборудования и при расчете калориферов. Результаты диссертационной работы внедрены в производственную деятельность ООО «НЕОВЕНТ» для расчета калориферов при проведении проектных работ.

#### **Соответствие диссертации и автореферата паспорту научной специальности**

Диссертационная работа и автореферат соответствуют паспорту специальности 2.4.6. – «Теоретическая и прикладная теплотехника», а именно пунктам:

п.5 – научные основы и методы интенсификации процессов тепло- и массообмена и тепловой защиты. Процессы тепло- и массообмена в



оборудовании, предназначенном для производства, преобразования, передачи и потребления теплоты»;

п.6 – научные основы повышения эффективности использования энергетических ресурсов в теплотехническом оборудовании и использующих теплоту системах и установках;

п. 8 – новые конструкции теплопередающих и теплоиспользующих установок и оборудования, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками. Совершенствование методов расчета и оптимизация параметров использующих теплоту технологических процессов, оборудования и систем;

Соответствие содержания диссертационной работы специальности 2.4.6. – «Теоретическая и прикладная теплотехника», по которой она представляется к защите, подтверждается апробацией работы, ее научной новизной и практической значимостью.

### **Общие замечания по содержанию и оформлению диссертации**

1. В подразделе 1.1 диссертации указано, что при незначительном изменении числа котельных в РФ отпуск теплоты потребителям в определенные периоды с 2012 по 2021 год возростал на 26%. Учитывались ли при этом вклад объектов малой распределенной генерации? Возможно именно эти источники, работающие по принципу когенерации, обеспечивали рост отпуска теплоты.

2. На с.58 диссертации указан диапазон допустимых температур при расчете калорифера от -30 до 500 °С, но не представлено обоснование.

3. На с.71 диссертации представлены значения локального коэффициента теплоотдачи для различных рабочих тел, но не указано, какие именно свойства представленных веществ влияют на коэффициент теплоотдачи.

4. На рис. 4.3 (с.104 диссертации) маркеры сливаются и не понятны зависимости для интенсивности теплообмена при различных числах Рейнольдса.

5. В подразделе 4.4. (с.114 диссертации) при оценке экономического эффекта предлагаемых решений не учитывается тот фактор, что при наложении пульсаций изменяется режим работы оборудования, что может привести к снижению его срока службы и более частому проведению ремонтов.

#### **Оценка языка и стиля диссертации и автореферата**

Автореферат выдержан по форме, объему и отражает основные положения диссертационной работы. Язык и стиль написания диссертации характеризуется ясностью и четкостью изложения материала.

#### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, полученных в диссертации, подтверждается корректным использованием современных методов исследования, базирующихся на основных положениях теории тепломассообмена, гидрогазодинамики, математического моделирования и численных методов. Достоверность полученных результатов обеспечена применением адекватного (подтвержденного сравнением с экспериментальными данными Э.Я. Эпик, А. А. Жукаускаса и Ф.В. Василева) метода математического моделирования, использованием апробированного метода исследования, выбором сетки, обеспечивающей требуемую точность.

#### **Подтверждение опубликования основных результатов диссертации в научной печати**

По теме диссертации опубликована 14 работа, в том числе 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях по списку ВАК, 1 статья в зарубежном издании, 2 патента на изобретение РФ, 1 патент на полезную модель РФ. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях.



## Заключение

Вышеуказанные замечания не снижают теоретической и практической ценности представленной диссертационной работы Петровой Н.П. Считаю, что диссертационная работа является законченной научно-квалификационной работой, соответствующей по актуальности, научной новизне, научной и практической значимости результатов, уровню исполнения и личному вкладу автора требованиям п. 9-14 «Положение о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Министерства образования и науки РФ, предъявляемых к кандидатским диссертациям, а соискатель Петрова Надежда Павловна заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.6. «Теоретическая и прикладная теплотехника».

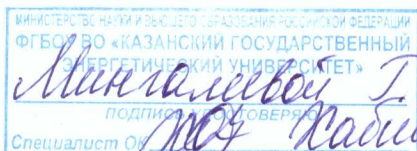
Результаты исследования соискателя следует рассматривать, как научно-обоснованные теоретические разработки, обеспечивающие решение практических задач по повышению эффективности теплообменного оборудования.

Заведующий кафедрой  
«Энергетическое машиностроение»  
ФГБОУ ВО «Казанский  
государственный энергетический  
университет», д.т.н., доцент

 Мингалеева Гузель Рашидовна

420066, г. Казань, Красносельская ул. 51  
Телефон: 89172768769  
E-mail.ru: mingaleeva-gr@mail.ru

декабря 2023 года



 Мингалеева Г.Р.  
Кабирбрахманова О.А.