

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

**доктора технических наук, доцента Морозова Андрея Владимировича  
на диссертацию Климовой Виктории Андреевны  
«Гидродинамика и теплообмен тепловыделяющих шаровых элементов  
ВТГР с радиальным течением теплоносителя»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность

### *Актуальность темы диссертации*

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) привлекают к себе внимание как источник высокопотенциальной теплоты для промышленных процессов. Сейчас развитие этого направления становится особенно актуальным в связи с вниманием, которое уделяется во всем мире вопросам снижения углеродного следа: расширение применения атомной энергии позволит сократить потребление органического топлива и уменьшить выбросы парниковых газов.

Энергоблок с ВТГР с насыпной активной зоной, состоящей из шаровых тепловыделяющих элементов, был недавно введен в эксплуатацию в Китайской Народной Республике. Проект НТГР-РМ во многом повторяет технические решения опытно-промышленных установок 70-х годов прошлого века. Однако выявленные опытом эксплуатации ВТГР проблемы, в частности, высокое сопротивление течению в шаровой засыпке и, следовательно, высокие затраты мощности на прокачку газового теплоносителя, до сих пор ждут решения. Возможным способом снижения гидравлического сопротивления засыпки может быть применение радиальной схемы течения. Изучение гидродинамики и теплообмена в шаровой засыпке при радиальном течении теплоносителя необходимо для оценки эффектов, связанных с наличием градиента скорости при течении газа сквозь шаровую слой, и получения зависимостей для расчета коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления.

Выбранная В.А. Климовой тема диссертации является актуальной и нацелена на решение важной задачи исследования газодинамики и теплообмена при радиальном течении газа в слое шаровых элементов и разработки методики теплогидравлических и конструктивных расчетов активной зоны реактора ВТГР и элементов энергетического комплекса переработки природного газа с учетом особенностей радиального течения теплоносителя.

## ***Практическая и теоретическая значимость полученных результатов***

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в том, что сформулировано описание эффектов, возникающих при градиентном течении через засыпку, определены условия возникновения таких эффектов. Практическая значимость заключается в получении эмпирических соотношений, которые можно использовать для теплогидравлического расчета активных зон ВТГР и элементов установок для производства водорода или синтез-газа.

## ***Степень обоснованности и достоверность результатов работы***

Научные положения, выносимые на защиту, в полной мере раскрыты в диссертации, автореферате и опубликованных работах. Их обоснованность подтверждается корректной постановкой задач, применением апробированных методик проведения экспериментальных исследований и программных продуктов, а также хорошим согласованием полученных Климовой В.А. результатов с опубликованными данными других авторов. Выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, вполне обоснованы.

Основные результаты научного исследования представлены в 24 научных публикациях, из них 9 статей в рецензируемых научных журналах, определенных ЗАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, в том числе 4 статьи в зарубежных изданиях, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science. Результаты доложены на 17 научных конференциях.

## ***Характеристика структуры и содержания диссертации***

Диссертационное исследование содержит введение, пять глав, заключение, 5 приложений, библиографический список из 150 наименований. Диссертация изложена на 132 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков и 17 таблиц.

Введение написано в традиционной для диссертаций форме и включает в себя обоснование актуальности темы, описание цели, задач, научной новизны, теоретической и практической значимости работы, методов решения задач диссертации, выносимые на защиту положения, обоснование достоверности полученных результатов.

В первой главе рассмотрены конструктивные и технологические особенности сооруженных к настоящему времени установок с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами и их проектов. Изучены возможности применения ВТГР в качестве источника

высокопотенциальной теплоты для промышленных производств, а также для выработки электроэнергии в цикле газотурбинной установки. Выполнен анализ работ российских и зарубежных исследователей, изучавших гидродинамику и теплообмен при течении газа сквозь свободную засыпку шаровых элементов. Приведен обзор работ, в которых изучаются эффекты, возникающие при ускоренном и замедленном течении газа. По результатам анализа библиографических источников автор делает вывод, что основная часть исследований относится к схеме с осевым течением газа в слое и не учитывает эффекты, связанные с градиентом скорости в направлении течения.

Во второй главе автор анализирует существующие методические подходы к моделированию турбулентных течений, приводит обзор полуэмпирических моделей турбулентности, применяемых в разных программных пакетах. Выполнена постановка задачи и представлены результаты моделирования течения газа в элементарной ячейке шаровой засыпки в условиях изотермического и неизотермического течения методами вычислительной гидродинамики. Результаты обобщены в виде соотношения, показывающего влияние неизотермичности на начало вихреобразования.

В третьей главе описана экспериментальная установка и методики измерения расхода газа, перепада давления и пульсаций статического давления при течении газа через шаровую засыпку. Приведены эмпирические зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от режимных и конструктивных параметров в условиях радиального течения газа, полученные по результатам обработки экспериментальных данных. Выполнено экспериментальное исследование пульсаций статического давления, показано возникновение эффекта реламинаризации при радиальном течении. Получена зависимость числа Струхала в зависимости от числа Рейнольдса, учитывающая возникновение эффекта реламинаризации при течении через засыпку.

В четвертой главе приведено описание экспериментальной установки для определения коэффициента теплоотдачи от шарового элемента к газу, который измерялся по нестационарной методике. Исследовано влияние направления течения на теплоотдачу. Результаты обобщены в виде эмпирического соотношения. Выполнено исследование теплообмена цилиндрического нагревателя, помещенного в шаровую засыпку, с потоком газа; эмпирические получены зависимости интенсивности теплоотдачи от конструктивных и режимных параметров течения.

В пятой главе предложена принципиальная схема производства синтез-газа на базе паровой конверсии метана с использованием ВТГР в качестве

источника высокопотенциальной теплоты. Приведена методика теплогидравлического расчета активной зоны ВТГР с радиальным течением теплоносителя. Проведено сравнение результатов расчета первого контура с показателями для установки с традиционной осевой схемой течения теплоносителя. Показано, что затраты мощности на прокачку теплоносителя для схемы с радиальным течением гораздо меньше, чем для осевой схемы.

### ***Научная новизна исследования***

1. Показано, что при радиальном течении газа в слое шаровой засыпки возникают эффекты реламинизации или турбулизации в зависимости от направления течения потоков. Экспериментально подтверждено, что при соотношении внутреннего и наружного радиусов установки с шаровой засыпкой  $r_{\text{н}}/r_{\text{в}} \geq 1,25$  влияние эффектов реламинизации и турбулизации на теплообмен и газодинамику установки существенно и должно учитываться в расчетных формулах.

2. Экспериментально исследовано влияние скорости и параметров течения (ускоренное или замедленное), тепловыделения и конструктивных особенностей установки на вихреобразование, гидравлическое сопротивление и теплообмен газа с шаровыми элементами при радиальном течении через засыпку.

3. Полученные экспериментальные данные обобщены в виде соотношений, отражающих влияние конструктивных и режимных параметров на гидравлическое сопротивление и теплообмен при течении газа через дисперсный слой шаровых элементов.

4. Получены данные компьютерного моделирования о полях температуры, скорости и вихреобразовании в элементах шаровой засыпки в широком диапазоне чисел Рейнольдса.

5. Разработана методика теплогидравлического и конструктивного расчетов активной зоны реактора ВТГР с радиальной схемой раздачи теплоносителя и сформулированы рекомендации по расчетам энерготехнологических аппаратов с аналогичной схемой течения рабочего газа в дисперсных слоях.

### ***Замечания по диссертации***

Положительно оценивая диссертацию в целом, ее логику, обоснованность, достоверность, полученные новые научные результаты, теоретическую и эмпирическую базу исследования, следует сформулировать следующие вопросы и замечания по работе:

1. Не совсем согласен с приведенным на стр. 13 диссертации

утверждением о низкой стоимости гелия (со ссылкой на литературу, выпущенную в 1980 и 1981 г). Гелий - достаточно редкий и дорогой газ, к тому же являющийся невозобновляемым ресурсом, добываемым из природного газа. Его запасы ограничены, а спрос растёт в медицине, электронике и других отраслях. Поэтому стоимость гелия, причем в виде как капитальных, так и эксплуатационных расходов, связанных с постоянной утечкой гелия при работе реактора на мощности, может стать одной из причин, ограничивающих сооружение ВТГР.

2. В первой главе работы в обзоре различных проектов ВТГР стоило бы упомянуть атомную энерготехнологическую станцию с реактором ВТГР-200, проект которого разработан в АО «ОКБМ Африкантов» и сооружение которой планируется в Республике Татарстан.

3. Почему, по мнению автора работы, несмотря на показанные в диссертации преимущества ВТГР с радиальным течением газового теплоносителя, в практике реакторостроения приоритет отдаётся установкам с осевым течением газа?

4. Можно ли оценить распределение скоростей газа и связанное с ним распределение температур шаровых тепловыделяющих элементов по радиусу активной зоны газоохлаждаемого реактора, рассматриваемого в пятой главе диссертации, учитывая наличие диффузорного режима течения? Как это распределение может повлиять на эксплуатацию ВТГР с радиальным течением газового теплоносителя?

### ***Заключение***

Диссертация Климовой Виктории Андреевны на тему «Гидродинамика и теплообмен тепловыделяющих шаровых элементов ВТГР с радиальным течением теплоносителя», представленная на соискание ученой степени кандидата технических наук, является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком уровне.

Диссертация и автореферат соответствуют следующим пунктам Паспорта специальности 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность: 2. Разработка методик экспериментальных методик и экспериментальные исследования в реакторных условиях и вне реакторов свойств и характеристик материалов, конструкций, оборудования и систем с целью выявления закономерностей их изменения в течение жизненного цикла объектов ядерной техники; 3. Разработка методов расчета технологических процессов в объектах ядерной техники с целью оптимизации их характеристик, повышения надежности оборудования и систем и

обеспечения их ядерной и радиационной безопасности.

Автореферат диссертации В.А. Климовой полностью соответствует тексту диссертации, отражает ее основное содержание, имеет логически грамотное построение и последовательность изложения результатов исследования.

По результатам диссертационного исследования автором опубликовано достаточное количество научных работ. Диссертационная работа удовлетворяет требованиям п.9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ, а ее автор, Климова Виктория Андреевна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность.

**Официальный оппонент:**

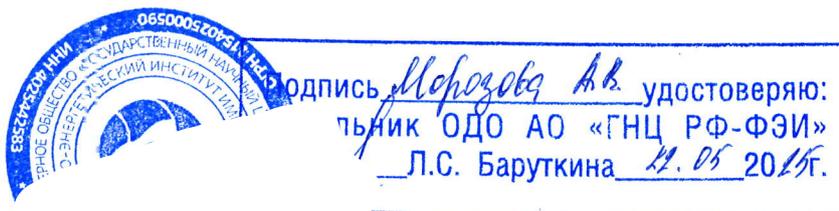
доктор технических наук, доцент  
АО «Государственный научный  
центр Российской Федерации –  
Физико-энергетический институт  
имени А.И. Лейпунского»,  
ученый секретарь

Морозов Андрей Владимирович

«22» мая 2025 г.

*Контактная информация:*

Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации –Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ») Почтовый адрес: 249033, г. Обнинск, Калужской обл., пл. Бондаренко, д. 1 Тел.: +7 (484) 399-70-00 (доб. 81-19), Адрес электронной почты: avmorozov@ipre.ru

  
Подпись Морозова А.В. удостоверяю:  
Печник ОДО АО «ГНЦ РФ-ФЭИ»  
Л.С. Баруткина 22.05.2025г.