

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, старшего научного сотрудника Хомякова Анатолия Павловича 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

В связи с повышенным вниманием к экологическим проблемам и необходимостью снижения выбросов парниковых газов в мире актуализируется проблема внедрения атомной энергетики в снабжение высокопотенциальным теплом промышленных производств. На сегодня единственным доступным вариантом для получения высокопотенциальной теплоты являются высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы ВТГР.

В работе Климовой В. А. рассматриваются вопросы газодинамики и теплообмена при радиальном течении теплоносителя в активных зонах ВТГР с шаровыми твэлами. Эта тематика выбрана с целью анализа возможностей снижения гидравлического сопротивления при течении газа сквозь шаровую засыпку и затрат мощности на прокачку газового теплоносителя. В работе исследованы эффекты, возникающие при течении газа через засыпку при наличии градиента скорости, получены эмпирические соотношения для расчета коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления. Тема диссертации является актуальной в рамках разработки методики теплогидравлических и конструктивных расчетов активной зоны реактора ВТГР и элементов энергетического комплекса переработки природного газа с учетом особенностей радиального течения теплоносителя.

Цель исследования

Повышение энергетической эффективности и совершенствование конструкции ВТГР и элементов энерготехнологического комплекса на базе ВТГР с радиальным течением теплоносителя.

Задачи исследования

1. Проведение экспериментальных исследований по газодинамике и теплообмену газа в слое из шаровых элементов при радиальном его течении и выявление существенных отличий параметров потока по сравнению с осевой схемой течения.
2. Компьютерное моделирование вихреобразования при течении газа в межшаровой области слоя в широком диапазоне чисел Рейнольдса в условиях изотермического и неадиабатического взаимодействия газа с элементами слоя с целью объяснения особенностей осевой и радиальной схемы течения.
3. Получение на основе анализа экспериментальных данных соотношений, отражающих влияние конструктивных и режимных параметров на гидравлическое сопротивление и теплообмен в слое с учетом

конструктивных особенностей схемы раздачи газа.

4. Разработка методики теплогидравлического расчета активной зоны реактора ВТГР с радиальным течением теплоносителя (гелия) в слое из шаровых тепловыделяющих элементов, составление рекомендаций по расчету параметров элементов энерготехнологических установок, использующих подобную схему течения газов.

Практическая и теоретическая значимость полученных результатов

Практическая значимость работы заключается в том, получены эмпирические соотношения для расчетов теплоотдачи и гидродинамического сопротивления при радиальном течении газа через шаровую засыпку, которые учитывают конструктивные и режимные особенности установки. Эти соотношения могут быть использованы при разработке элементов энерготехнологических комплексов на базе ВТГР с радиальным течением теплоносителя в слое из шаровых элементов. Теоретическая значимость исследования заключается в том, что результаты, полученные во время работы над диссертацией, расширяют представление о течении потоков газа сквозь слой шаровых элементов в условиях градиентного течения.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что доказано возникновение эффектов реламинаризации или турбулизации при радиальном течении газа сквозь шаровую засыпку. Экспериментально исследовано влияние скорости и параметров течения, тепловыделения и конструктивных особенностей установки на вихреобразование, гидравлическое сопротивление и теплообмен газа с шаровыми элементами, получены эмпирические соотношения.

Степень обоснованности и достоверность результатов работы

Достоверность результатов работы обеспечивается использованием апробированных методик проведения экспериментальных исследований и моделирования, а также сравнением данных, полученных Климовой В. А., с опубликованными данными других авторов.

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

Характеристика структуры и содержания диссертации

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

Введение 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 описано современное состояние высокотемпературной атомной энергетики, проанализированы конструктивные и технологические опытно-промышленных и исследовательских установок с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами (ВТГР). Выполнена оценка возможности применения ВТГР в качестве источника высокопотенциальной теплоты для промышленных производств и для выработки электроэнергии в цикле газотурбинной установки. Выполнен обзор научных работ российских и зарубежных авторов, изучавших гидродинамику и теплообмен при течении газа сквозь слой шаровых элементов. Поставлены задачи исследования.

Во второй главе приведено описание методик вычислительной гидродинамики, рассмотрены современные способы моделирования турбулентных течений, дан обзор полуэмпирических моделей турбулентности, применяемых в программных пакетах вычислительной гидродинамики. Приведены результаты моделирования течения газа в ячейке шаровой засыпки в условиях изотермического течения и при наличии энерговыделения в шаровых элементах. Результаты обобщены в виде соотношения, показывающего влияние неизотермичности на начало вихреобразования. Выполнена оценка достоверности моделирования при помощи сравнения с опубликованными экспериментальными данными разных авторов.

В третьей главе сделано описание экспериментальной установки, состоящей из двух коаксиальных перфорированных цилиндров, пространство между которыми заполнено засыпкой из шаровых элементов. Описаны методики измерения расхода газа, перепада давления и пульсаций статического давления при течении газа через шаровую засыпку. Результаты экспериментов обобщены в виде эмпирических зависимостей коэффициента гидравлического сопротивления от режимных и конструктивных параметров в условиях радиального течения газа. Обоснован выбор характеристик, отражающих особенности ускоренного или замедленного течения. Выполнено экспериментальное исследование пульсаций статического давления, результаты обработаны в виде критериальной зависимости.

В четвертой главе описана экспериментальная установка и методика определения коэффициента теплоотдачи от шарового элемента к газу при радиальном течении. Получены эмпирические зависимости интенсивности теплоотдачи от конструктивных и режимных параметров течения. Исследовано влияние градиента скорости на теплоотдачу при радиальном течении газа через засыпку, выполнено сравнение с течением в отсутствие градиента скорости. Результаты обобщены в виде эмпирического

соотношения.

В пятой главе выполнен теплогидравлический расчет активной зоны ВТГР с радиальным течением теплоносителя и расчет потерь давления и мощности газодувки первого контура с использованием эмпирических зависимостей, полученных автором. Для сравнения выполнен теплогидравлический расчет активной зоны с осевым течением теплоносителя. Предложена принципиальная схема производства синтез-газа на базе паровой конверсии метана с обеспечением высокопотенциальной теплотой от ВТГР.

Научная новизна исследования

1. Показано, что при радиальном течении газа в слое шаровой засыпки возникают эффекты реламинаризации или турбулизации в зависимости от направления течения потоков. Экспериментально подтверждено, что при соотношении внутреннего и наружного радиусов установки с шаровой засыпкой $r_n/r_b \geq 1,25$ влияние эффектов реламинаризации 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

Общая оценка работы в целом положительная. Работа написана грамотно и оформлена хорошо. Цель исследования была достигнута, поставленные задачи были решены.

Однако есть опечатки, повторения. Например:

– в списке литературы указан справочник - [144] Кириллов П. Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы,

теплообменники, парогенераторы). / П. Л. Кириллов, Ю. С. Юрьев, В. П. Бобков. – М.: Энергоатомиздат, 19990. – 360 с., реальный год издания – 1990. Кроме того, необходимо отметить, что творческий коллектив этого справочника в 2010 г. выпустил новую версию справочника, в двух томах, который должен был занять достойное место в списке литературы;

– в первой главе на стр. 22 и 23 приведены реакции восстановления железа (формулы 1.3 и 1.4), в главе 5 на стр. 90 представлены эти же уравнения, но под номерами (5.1) и (5.2);

– на стр. 66 представлена запись: «Рисунок 3.9 – Схема размещения микроприемников давления в шаровой засыпке с радиальным (а) и осевым (б) течением газа: 1 – $r/r_B = 1,3$; 2 – $r/r_B = 3$; 3 – $r/r_B = 4,8$ », должно быть: «1 – $r/r_B = 4,8$; 2 – $r/r_B = 3$; 3 – $r/r_B = 1,3$ », согласно рисунка 3.5 на стр.57;

– на стр. 67 представлена запись: «На рисунке 3.11 представлена зависимость относительной интенсивности пульсаций статического давления от координаты расположения приемников давления вдоль радиуса экспериментальной установки r/r_B », а на самом рисунке радиус представлен в виде отношения r/r_H .

Вопросы и замечания:

1. Одним из немаловажных аспектов исследований автора (как экспериментальных, так и выполненных вычислительными методами) является изучение турбулентных эффектов и явлений в слое шаровых тепловыделяющих элементов. В подразделе 2.1 автор указывает, что для моделирования турбулентности используются RANS-модели (k-ε или k-ω). Какая именно модель была использована в вычислительных экспериментах? Учитывает ли автор, что данные модели являются не явными, что с одной стороны позволяет использовать грубые дискретизации по пространству и времени решения, но с другой стороны, не позволяет получить точные явные количественные оценки турбулентных пульсаций?

2. В пояснении к уравнению (2.13) автор указывает, что турбулентная вязкость зависит от особенностей турбулентного течения, а не от свойств жидкости и определяется по эмпирическим уравнениям. Следует отметить, что часто применяющееся в практике вычислительной гидродинамики для расчета турбулентной вязкости уравнения Колмогорова (использующееся с k-ε моделью Лаундера и Сполдинга) определяет турбулентную вязкость через удельную кинетическую турбулентную энергию k, ее диссипацию ε, плотность текущей среды и эмпирическую константу C_μ . Вторая названная автором модель k-ω действительно использует вихревую вязкость, не зависящую от модельных констант и свойств потока. Какие уравнения для расчета турбулентной вязкости применялись при моделировании, какая модель применялась – k-ε или k-ω? Чему равны модельные константы для используемой модели (k-ε или k-ω)?

4. В представленных базовых уравнениях сохранения (2.1) – (2.3) не

учитывается влияние теплового излучения на сохранение энергии. Также автор ни в экспериментальных исследованиях, ни при численном моделировании не сообщает, учитывалось ли тепловое излучение при исследовании процессов отвода тепла от тепловыделяющих элементов, имеющих высокие температуры. Необходимо учитывать или нет тепловое излучение? Если нет, то почему?

5. На рисунке 2.8 автор приводит распределение относительных чисел Нуссельта по поверхности тепловыделяющих элементов, но не приводит методики расчета значений критериев Нуссельта ни в явном виде, ни в виде ссылок на приведенные ранее уравнения. Как рассчитывалось число Нуссельта?

6. При рассмотрении организации движения газа в пространстве засыпки имитатора с радиальным направлением движения газа (раздел 3.2, рис. 3.1, рис. 3.5, б) автор не учитывает влияние коллекторного эффекта на распределение газа по высоте слоя засыпки.

7. В главе 5 на стр. 95 автор указывает, что активная зона реактора представляет собой два коаксиальных перфорированных цилиндра, пространство между которыми заполнено шаровыми твэлами. Как планируется обеспечить равномерное распределение скорости газового потока на входе в активную зону через перфорированный наружный цилиндр?

8. В четвертой главе работы недостаточно подробно описана методика измерения температуры, оценка погрешности, способ градуировки термопар.

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.

Диссертация и автореферат соответствуют 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 соответствует 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, старший научный сотрудник ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», заведующий кафедрой машин и аппаратов химических и атомных производств



Хомяков Анатолий Павлович

Контактная информация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,
620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, +7 (343) 375-44-48
Адрес электронной почты: a.p.khomiakov@urfu.ru

«30» мая 2025 г.

ПОДПИСЬ
ЗАВЕРЯЮ.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ УРФУ
МОРОЗОВА В.А.

