

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

*доктора технических наук Байрамова Артёма Николаевича
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

Проблема разработки и совершенствования АЭС с ВТГР имеет давнюю историю. В ряде стран мира, в том числе и в России имеется опыт эксплуатации ряда опытно-демонстрационных АЭС с реакторами ВТГР. В настоящее время интерес к этой технологии возрождается, как в России, так и в некоторых странах мира (Япония, Китай). Прежде всего, это связано с возможностью получения высокой температуры теплоносителя (гелия) на выходе из активной зоны порядка 1000 °С. В этой связи АЭС с ВТГР могут обеспечивать высокотемпературным теплом без углеродного следа такие энергоемкие отрасли промышленности, как металлургия, нефтепереработка, химическая промышленность. Кроме того, АЭС с ВТГР открывает широкую перспективу для производства водорода методом паровой конверсии природного газа и высокотемпературным электролизом пара. Но в условиях сложившейся парадигмы о декарбонизации мировой экономики, очевидно, что больший акцент будет сделан именно на методах получения водорода из воды, прежде всего.

Следует отметить, что к настоящему времени в данной технологии есть решение одной из главных проблем, связанной с текучестью гелия. Прочие технические решения в этом направлении также продолжают совершенствоваться.

Одной из конструктивных особенностей реакторов ВТГР является шаровая компоновка активной зоны в виде свободной засыпки. Так, не менее важной проблемой являются энергозатраты на прокачку теплоносителя через слой шаровой засыпки твэлов, что и явилось проблемой для исследования в данной диссертационной работе. В частности, автором диссертации затронута проблема снижения гидравлических сопротивлений при прокачке теплоносителя через активную зону, выполненной в виде шаровой засыпки твэлов. В связи с чем предложен новый подход за счет течения теплоносителя в радиальном направлении в слое шаровой засыпки. При этом отмечается, что в предыдущих технических решениях применялась схема с осевым течением

теплоносителя через слой шаровой засыпки, которая является не эффективной по критерию гидравлического сопротивления.

Таким образом, тема диссертационного исследования В. А. Климовой является актуальной и нацелена на решение важнейшей задачи в области газодинамики и теплообмена при радиальном течении газа в слое шаровых твэлов, а также разработку методики теплогидравлического и конструктивного расчета активной зоны реактора ВТГР.

Степень обоснованности и достоверность научных положений, выводов, рекомендаций, сформулированных в диссертации

Достоверность научных результатов и выводов диссертационной работы Климовой В. А. обоснована применением апробированных методов проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных и использованием метрологически поверенного оборудования, что позволило выполнить все необходимые экспериментальные измерения с необходимой точностью.

Компьютерное моделирование выполнялось с использованием профессиональных лицензионных пакетов (Comsol.Multiphysics, Flow Simulation).

Выводы находятся в полном соответствии с содержанием диссертации.

Апробация результатов диссертационной работы не вызывает сомнений. Основные положения и результаты диссертационной работы доложены на множестве различных конференций, начиная с 2008г. Количество опубликованных работ в изданиях ВАК РФ достойное.

Таким образом, не возникает сомнений выносимых на защиту научных результатов диссертационной работы Климовой В.А.

Практическая и теоретическая значимость полученных результатов

Практическая значимость диссертационной работы Климовой В. А. заключается в разработке рекомендаций по теплогидравлическому расчету активной зоны реактора ВТГР на базе нового технического решения по обеспечению радиального течения теплоносителя в слое шаровой засыпки твэлов. Данные рекомендации могут быть использованы ведущими проектными организациями в области ВТГР.

Теоретическая значимость заключается в разработке методики теплогидравлического расчета активной зоны реактора ВТГР с шаровой засыпкой.

Характеристика структуры и содержания диссертации

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

В первой главе анализируется прошедший и современный опыт эксплуатации различных опытно-демонстрационных АЭС с ВТГР. Анализируется обзор литературных источников по гидродинамике и теплообмену газового потока в засыпке из шаровых твэлов. Автор приходит к выводу о необходимости учета ускорения потока при радиальном течении газа в шаровом слое твэлов и необходимости изучения возникающих при этом эффектов реламинаризации (турбулизации) потока теплоносителя.

Во второй главе описаны существующие методические подходы к моделированию турбулентных течений методами вычислительной гидродинамики, приведен обзор существующих полуэмпирических моделей турбулентности, приведены результаты моделирования обтекания одиночного шара и их сравнение с приведенными в литературе экспериментальными данными. Ставится задача моделирования течения газа через элементарную ячейку шаровой засыпки, формулируются требования к расчетной сетке, выполняется обобщение полученных результатов в виде числа Рейнольдса, отвечающего началу вихреобразования, от отношения температур шарового элемента и газового теплоносителя. В результате проведенного исследования автор делает вывод о возможностях применения методов вычислительной гидродинамики для достижения целей диссертационного исследования и о необходимости проведения натурных экспериментов.

В третьей главе приведено описание экспериментальной установки и методики проведения исследований гидравлического сопротивления шаровой засыпки твэлов при радиальном течении теплоносителя. По результатам статистической обработки экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от основных режимных и конструктивных параметров шаровой засыпки. Обнаружено возникновение эффекта реламинаризации, которое сопровождается уменьшением относительной интенсивности пульсаций статического давления. Проведена обработка экспериментальных данных в форме безразмерного критерия Струхала в зависимости от числа Рейнольдса, получена зависимость, учитывающая возникновение эффекта реламинаризации при течении через засыпку.

В четвертой главе описана методика экспериментального измерения коэффициента теплоотдачи от шарового элемента к газу при радиальном течении сквозь шаровую засыпку. Выполнены исследования влияния направления течения на интенсивность теплоотдачи и газодинамическое

сопротивление засыпки. Установлено, что интенсивность теплообмена шарового слоя с газовым потоком при ускоренном его течении заметно меньше, чем при замедленном течении, что связано с проявлением эффектов реламинаризации (турбулизации) в зависимости от направления течения потока в установке с радиальной схемой течения. Результаты экспериментальных исследований обобщены в виде эмпирического соотношения с учетом геометрических и режимных особенностей течения. В главе также приведены результаты исследования теплообмена цилиндрического нагревателя с потоком газа в шаровой засыпке и получены зависимости, предназначенные для расчета элементов установок по производству водорода и синтез-газа.

В пятой главе приведена принципиальная схема ядерно-энергетической системы для производства синтез-газа на базе паровой конверсии метана. Выполнен теплогидравлический расчет активной зоны ВТГР с радиальным течением теплоносителя, а также расчет затрат мощности на прокачку теплоносителя. Выполнен также расчет установки с традиционной осевой схемой течения теплоносителя. Показано, что применение радиальной схемы позволяет на порядок снизить сопротивление шаровой засыпки.

Научная новизна исследования

1. Показано проявление эффектов реламинаризации и турбулизации при радиальном течении газа в слое шаровой засыпки, определены условия возникновения эффектов в зависимости от конструктивных и режимных параметров (п. 2 Паспорта специальности ВАК).

2. Разработана экспериментальная установка и методики исследования влияния направления течения, тепловыделения и конструктивных особенностей установки на вихреобразование, гидравлическое сопротивление и теплообмен газа с шаровыми элементами при радиальном течении через засыпку (п. 1 и 2 Паспорта специальности ВАК).

3. Получены эмпирические соотношения для расчета гидравлического сопротивления и коэффициентов теплоотдачи при течении газа через дисперсный слой шаровых элементов (п.1 и 3 Паспорта специальности ВАК).

4. Разработана методика теплогидравлического расчета активной зоны ВТГР с радиальной схемой раздачи теплоносителя, сформулированы рекомендации по расчетам энерготехнологических аппаратов с радиальной схемой течения (п. 3 Паспорта специальности ВАК).

Замечания по диссертации

Вместе с тем в ходе изучения диссертации, возникли следующие вопросы и замечания.

1. В диссертации не показан принцип (отсутствует принципиальная схема) образования радиального направления течения теплоносителя внутри слоя твэлов в активной зоне реактора ВТГР?

2. В чем заключается физический смысл для радиальной схемы распределения (подачи) теплоносителя относительно бóльшая интенсивность пульсаций статического давления по сравнению с осевым распределением? А также в чем физический смысл самих пульсаций статического давления в данном контексте?

3. Почему с ростом числа Re реламинаризация снижает интенсивность пульсаций статического давления (вывод 6 к разделу 3 диссертации)? В чем заключается физическая взаимосвязь снижения интенсивности пульсаций статического давления по мере роста числа Re ?

4. Установлена ли взаимосвязь интенсивности пульсаций статического давления с коэффициентом гидравлического сопротивления? Другими словами, на каком основании сделан вывод 3 к разделу 3 диссертации?

5. В связи с чем число Nu для схемы с радиальным течением становится ниже для схемы с осевым течением по мере роста числа Re (рис.4.3 и 4.6 диссертации)? Ведь с ростом Re поток турбулизируется (реламинаризация), что, очевидно, должно приводить к росту числа Nu .

Заключение

Сделанные вопросы и замечания носят уточняющий характер и не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы.

Диссертационная работа 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 трем пунктам Паспорта специальности 2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность: 1. Моделирование нейтронно-физических, химических, тепловых, гидравлических и механических процессов, создание программных комплексов, обеспечивающих достоверное расчетное обоснование объектов ядерной техники и их безопасное функционирование при эксплуатации, а также снятии с эксплуатации. 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 и лаконично содержит ее основную часть.

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
Федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.»,
профессор кафедры «Тепловая и
атомная энергетика» имени А.И. Андрющенко
Байрамов Артём Николаевич

Контактная информация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Саратовский государственный технический
университет имени Гагарина Ю.А.», 410054, г. Саратов, ул. Политехническая,
77, кафедра «Тепловая и атомная энергетика» имени А.И. Андрющенко
(8452) 99-87-55

Адрес электронной почты: art2198@yandex.ru

«22» мая 2025 г.

Подпись Байрамова А.Н. Ученый секретарь Ученого совета
заверяю СГТУ имени Гагарина Ю.А.

А.В. Потапова

