Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

На правах рукописи

Климова Виктория Андреевна

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ШАРОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ВТГР С РАДИАЛЬНЫМ ТЕЧЕНИЕМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность

АВТОРЕФЕРАТ диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Екатеринбург – 2025

Работа выполнена на кафедре атомных станций и возобновляемых источники энергии Уральского энергетического института ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор, Щеклеин Сергей Евгеньевич		
Официальные оппоненты:	Байрамов Артём Николаевич, доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», профессор кафедры тепловой и атомной энергетики; Морозов Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент, АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико- энергетический институт имени А.И. Лейпунского», г. Обнинск Калужской обл., ученый секретарь;		
	Хомяков Анатолий Павлович, 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 Химико-		

Защита состоится 10 июня 2025 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета УрФУ 2.4.07.17 по адресу: 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, ауд. И-420 (зал Ученого совета).

технологического института.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» <u>https://dissovet2.urfu.ru/mod/data/view.php?d=12&rid=7161</u>

Автореферат разослан _____ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Ташлыков Олег Леонидович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из перспективных направлений развития ядерной энергетики являются инновационные ядерно-энергетические системы (ЯЭС) повышенной безопасности и экономичности с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами (ВТГР). Интерес к ВТГР обусловлен возможностью получать в этих установках температуру газового теплоносителя до 950-1000 °С и ЯЭС ΒΤΓΡ использовать с для производства электроэнергии В газотурбинном термодинамическом цикле, а также как источник теплоснабжения промышленных производств.

Внедрение ЯЭС с ВТГР в энергоснабжение технологических процессов возможно в качестве источника высокопотенциальной теплоты непосредственно или путем выработки вторичного энергоносителя – водорода или синтез-газа (смеси водорода с СО). Теплота ядерного реактора замещает теплоту сгорания органических топлив, что приводит к экономии топлива, понижению энергоемкости продукции и уменьшению выбросов парниковых газов, т. е. экологической нагрузки.

К настоящему времени накоплен солидный опыт эксплуатации исследовательских и опытно-промышленных ВТГР, в результате чего выявлены две основные концепции конструкции – активная зона с шаровыми твэлами в виде свободной засыпки и активная зона со стержневыми или призматическими твэлами. Для энерготехнологического применения ВТГР с шаровой засыпкой предпочтительнее, так как перегрузку топлива можно осуществлять «на ходу».

Технология ВТГР с шаровой засыпкой имеет ряд не решенных к настоящему времени проблем, одна из них – высокое гидродинамическое сопротивление шаровой засыпки. Традиционно газовый теплоноситель движется между шаровых твэлов в осевом направлении, преодолевая слой толщиной в несколько метров. При выборе схемы с радиальным течением газового потока внутри дисперсного слоя твэлов появляется возможность реализации более компактной конструкции реактора с меньшими гидравлическими потерями на перекачку теплоносителя. При расчетах теплогидравлических характеристик реакторов подобной конструкции

необходимо учитывать особенности радиального течения газа, связанные с изменением скорости потока от входа раздаточного коллектора к выходу приемного коллектора. Таким образом, исследование газодинамики и теплообмена при радиальном течении газа в слое шаровых элементов и разработка методики теплогидравлических и конструктивных расчетов активной зоны реактора ВТГР и элементов энергетического комплекса переработки природного газа с учетом особенностей радиального течения теплоносителя является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы исследования. К настоящему моменту достаточно полно исследованы геометрические характеристики нерегулярных засыпок шаровых элементов, получены эмпирические зависимости, описывающие газодинамику и теплообмен при осевом течении газа через насыпной слой. Изучено радиальное течение газа или жидкости с малыми числами Рейнольдса применительно к аппаратам химической технологии. В области ядерной энергетики радиальное течение теплоносителя в слое шаровых элементов рассматривалось применительно к микротвэльным тепловыделяющим сборкам водоводяных энергетических реакторов. Специальных систематизированных исследований по оценке газодинамических и тепловых эффектов, связанных с неравномерностью течения газовых потоков в шаровых слоях, не проводилось.

Объект исследования – газодинамика и теплообмен в модели насыпной активной зоны ВТГР с радиальным течением газового теплоносителя.

Предмет исследования – процессы газодинамики и теплообмена при радиальном течении газа в шаровой засыпке.

Целью исследования является 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 неизотермического 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.

Методы исследования. В проведенных исследованиях применялись экспериментальные и расчётно-аналитические методы. Методологической базой диссертационной работы являются работы Р. Г. Богоявленского, Н. Н. Пономарёва-Степного, А. Я. Столяревского.

Научная новизна работы состоит в том, что

1. Показано, что при радиальном течении газа в слое шаровой засыпки возникают эффекты реламинаризации или турбулизации в Экспериментально зависимости ОТ направления течения потоков. подтверждено, что при соотношении внутреннего и наружного радиусов $r_{\rm H}/r_{\rm B} \geq$ установки с шаровой засыпкой 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.

Теоретическая Полученные значимость. результаты диссертационного исследования расширяют представление о течении потоков газа сквозь слой шаровых элементов в условиях градиентного течения. Определены условия возникновения эффектов реламинаризации и турбулизации при радиальном течении потока газа, показано влияние этих эффектов на теплообмен и гидравлическое сопротивление. Получены и обобщены в виде эмпирических соотношений данные по влиянию особенностей тепловыделения конструктивных установки И на вихреобразование, гидравлическое сопротивление и теплообмен газа с шаровыми элементами при радиальном течении через засыпку.

Практическая значимость работы заключается в том, что полученные в результате проведенных исследований соотношения и предложенные рекомендации могут быть использованы при разработке элементов энерготехнологических комплексов на базе ВТГР с радиальным течением теплоносителя в слое из шаровых элементов.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается применением апробированных методов проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных и использованием метрологически поверенного оборудования, позволяющего выполнить измерения контролируемых параметров с необходимой точностью, а также хорошим согласованием полученных данных с опубликованными данными других

авторов. Экспериментальные исследования проводились на стендах специализированных лабораторий кафедры «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ.

Личный вклад автора заключается в анализе данных по течению и теплообмену газа в шаровой засыпке; в постановке и проведении расчетных и экспериментальных исследований; в обработке и анализе полученных результатов; разработке рекомендаций по методике теплогидравлического расчета активной зоны ВТГР и технологических аппаратов с радиальной раздачей теплоносителя.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Результаты экспериментальных исследований и сформированный на их основе ряд соотношений, позволяющих рассчитывать газодинамическое сопротивление шарового слоя, коэффициенты теплоотдачи газового потока к шаровым элементам и трубным пучкам в слое при радиальном течении потока теплоносителя.

2. Результаты исследований по вихреобразованию, реламинаризации и турбулизации при радиальном течении газа в шаровой засыпке.

3. Результаты численного моделирования течения газа в межшаровой области слоя, устанавливающие зависимость начала вихреобразования и перехода от ламинарного режима течения к турбулентному от разницы температуры поверхности шаров и температуры газа.

4. Методика теплогидравлического и конструктивного расчетов активной зоны реактора ВТГР с шаровыми твэлами и радиальным течением теплоносителя вместе с рекомендациями по расчету параметров установок с аналогичной схемой течением газа в энерготехнолологических комплексах производства синтез-газа.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены на 17 научных конференциях: XIV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (Екатеринбург, 2008), XV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (Екатеринбург, 2008), XVI Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники (Екатеринбург, 2009), Всероссийской НПК «Энерго- и

ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2009), Международном научном молодежном симпозиуме «Безопасность биосферы 2009» (Екатеринбург, 2009 г.), III НТК «Безопасность Всероссийской критичных инфраструктур И территорий» (Екатеринбург, 2009), XVII Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники (Екатеринбург, 2010), IX Международной ΗΠК «Проблемы и достижения в промышленной энергетике» (Екатеринбург, Всероссийской НПК 2010), «Энерго-И ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2010), I Евроазиатской выставки и конференции «Энергетика настоящего И будущего» (Екатеринбург, 2010); Всероссийской НПК «Энергетика XXI века. Техника, экономика и кадров» (Екатеринбург, 2011); Всероссийской подготовка междисциплинарной молодежной научной конференции «Информационная школа молодого ученого» (Екатеринбург, 2011); First International Conference On Energy Production and Management in the 21st Century: the Quest for Sustainable Energy (Екатеринбург, 2014); Всероссийской научной междисциплинарной молодежной конференции «IV Информационная школа молодого ученого» (Екатеринбург, 2014); Первой научно-технической конференции молодых ученых УралЭНИН (Екатеринбург, 2016); Х Информационной школы молодого ученого (Екатеринбург, 2022); International Conference "Energy, Ecology, Climate 2025 – WCAEE-ICEEC-2025» (Черногория, Будва, 2025 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 24 научных работы, в том числе 9 статей в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, их них 4 статьи в изданиях, индексируемых Scopus и WoS.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, 5 приложений, списка литературы, включающего 150 наименований. Работа изложена на 132 страницах, содержит 46 рисунков и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обоснованы выбор направления исследования и его цель, определен круг основных задач исследования, показаны актуальность, научная и практическая значимость решаемых проблем.

B первой главе выполнен анализ текущего состояния высокотемпературной ядерной энергетики, сделан обзор существующих исследовательских проектов, опыта эксплуатации И опытнопромышленных ВТГР, а также возможностей использования ВТГР в составе ядерно-технологического комплекса для производства водорода и водородсодержащих газов. Приведен аналитический обзор литературных источников по гидродинамике и теплообмену газового потока в слое рассмотрены закономерности шаровых элементов, изменения газодинамических и теплообменных характеристик потока в зависимости от геометрических параметров засыпки и режимов течения, выполнен анализ работ, посвященных проблеме реламинаризации и турбулизации газового потока при наличии градиента скорости в направлении течения.

Bo второй главе представлены результаты численного моделирования течения и теплообмена газа в элементарной ячейке засыпки, проведенного с помощью стандартных пакетов шаровой вычислительной гидродинамики. Исследовано вихреобразование при изотермическом течении, влияние тепловыделения в шаровых элементах на структуру течения. Моделирование течения газа в межшаровой области слоя показало, что начало вихреобразования и переход от ламинарного режима к турбулентному в неизотермических условиях течения смещается в область больших чисел Рейнольдса по сравнению с изотермическими условиями течения. Получено соотношение, характеризующее вихреобразование и переход от ламинарного режима течения к турбулентному в зависимости от отношения температуры поверхности шаров и температуры газа:

$$\operatorname{Re}_{H}(T) = 423 (T/T_0)^{0.31} \cdot \left[1 - \exp(-0, 21 \cdot T/T_0)\right], \quad (1)$$

где $\operatorname{Re}_{H}(T)$ – число Рейнольдса, соответствующее началу образования вихря; T – температура поверхности шаров, K; $T_0 = 293$ K – температура газа в межшаровой области ячейки.

Выполнено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными. Отношение минимальных и максимальных значений чисел Nu лежит в диапазоне 2,2...8,0, характерном для локальных коэффициентов теплоотдачи по поверхности сферы в ромбоэдрической укладке.

На рисунке 1 показано распределение интенсивности теплоотдачи по поверхности шаровых элементов в расчетной ячейке в виде относительного числа Нуссельта. Объемная плотность тепловыделения $q_V = 9,5 \cdot 10^6 \text{ Bt/m}^3$ соответствует энергонапряженности шаровых твэлов в газоохлаждаемых реакторах.

Максимальная неравномерность распределения коэффициента теплоотдачи по поверхности шаров наблюдалась при сравнительно малых $\text{Re} \leq 300$, с увеличением скорости потока ($\text{Re} \geq 10^3$) неравномерность заметно уменьшается, что можно объяснить возрастанием турбулентности потока и снижением влияния интенсивности отрывных вихрей.



Рисунок 1 – Компьютерное моделирование распределение относительного числа Нуссельта по поверхности тепловыделяющих шаров. Значения *Nu*/*Nu*: a) *Re*=300; 1 − 1,12; 2 − 0,98; 3 − 0,81; 4 − 0,58; 5 − 0,62; 6 − 0,16; 6) *Re*=1000; 1 − 1,2; 2 − 0,73; 3 − 0,36.

В третьей главе приводится описание методик исследований и экспериментальной установки для изучения радиального течения газа в шаровой засыпке. Корпус установки состоит из двух коаксиальных перфорированных цилиндров (коллекторов) с отверстиями для прохода воздуха диаметром 2 мм. Пространство между цилиндрами заполнено шаровыми элементами диаметром 7,0; 15 или 22 мм. Внешний цилиндр имеет диаметр 100 или 200 мм, внутренний – 28 мм, высота обоих цилиндров 55 мм. Пористость шаровой засыпки равнялась 0,3...0,45. Подача воздуха осуществлялась газодувкой, которая работала в режиме всасывания или нагнетания, обеспечивая ускоренное или замедленное течение в радиальном направлении. На рисунке 2 приведена принципиальная схема экспериментальной установки.



Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки: 1 – насадка с перфорированными чехлами; 2 – узел измерения расхода; 3 – подводящий трубопровод; 4 – газодувка; 5 – шаровые элементы; 6 – измерительные приборы

Газодинамическая структура потока анализировалась в диапазоне чисел Рейнольдса (в расчетном сечении слоя) 5·10²...10⁴ путем измерений пульсаций статического давления и их частот. Шаровые приемники статического давления имели одинаковые размеры с основными шаровыми элементами и помещались внутри слоя на расстояниях $r/r_e=1,25, 3,0, 4,2$ и 4,8 (внешний коллектор 200 мм) и $r/r_{e}=1,25, 2,1$ и 3,0 (внешний коллектор 100 мм), $r_{\rm B}$ – радиус внутреннего коллектора. Приемники давления соединялись с микроманометром при измерении средних значений давления или с электретными датчиками давления при измерении пульсационных параметров (рисунок 3). Для сравнения проводились аналогичными шаровыми элементами опыты с на установке прямоугольного сечения с осевой схемой течения газа.



Рисунок 3 – Схема измерения пульсаций статического давления и его спектра: 1 – шаровой приемник давления; 2 – электретный датчик давления; 3, 6 – мультиметр; 4 – анализатор спектра; 5 – осциллограф

Проведенные исследования гидравлического сопротивления засыпки при радиальном течении газа показали, что коэффициент гидродинамического сопротивления (КГС) зависит от пористости слоя и параметра $\chi = 4(r_{\rm H}/r_{\rm B}+r_{\rm B}/r_{\rm H}+2)^{-1}$, который учитывает влияние относительной поверхности коллекторов. По кривизны результатам измерений распределения статического давления в слое получена зависимость КГС от основных режимных и конструктивных параметров:

$$\xi_r = \frac{108}{\epsilon^4} \cdot \operatorname{Re}_{\bar{r}}^{-0.79} \cdot \chi; d_{\mathrm{III}} = 15 \text{ M} 22 \text{ MM}; 0,4 \le \epsilon \le 0,44;$$
(2)

$$\xi_r = \frac{4,36}{\epsilon^4} \cdot \operatorname{Re}_{\overline{r}}^{-0,35} \cdot \chi ; d_{\mathrm{III}} = 7 \text{ MM}; \ \varepsilon = 0,31.$$
(3)

где $\operatorname{Re}_{\overline{r}}$ – число Рейнольдса для скорости потока в сечении $\overline{r} = 0,5(r_{e}+r_{h})$. Эмпирические соотношения получены для отношений наружного и внутреннего радиусов коллекторов в диапазоне $3,5 \le r_{h}/r_{e} \le 7,1$, при изменении числа Рейнольдса в пределах $\operatorname{Re}_{\overline{r}} = 3 \cdot 10^{2} \dots 5 \cdot 10^{4}$. Эти соотношения целесообразно использовать для расчетов потери давления в слое шаровых элементов при радиальной раздаче газа.

Интенсивность пульсаций статического давления, которая непосредственно связана с отрывными характеристиками вихрей, развивающихся на поверхности шаров, измерялась в виде:

$$\eta = \sqrt{p^2} / q , \qquad (4)$$

где $\sqrt{p^2}$ – среднеквадратичный уровень пульсаций статического давления, Па; $q = 0.5 \rho_{\Gamma} U_r^2$ – динамический напор, Па; U_r – местная

скорость потока при отсутствии шарового слоя, м/с. Результаты измерений представлены на рисунке 4.



При радиальном течении параметр η менялся от 0,95 вблизи внешнего раздаточного коллектора при относительно малых числах Re_r до значения 0,1–0,25 вблизи внутреннего коллектора, где значения $Re_r > 10^3$, что связано не только с расходом газа, но и с ускорением потока в радиальном направлении и проявлением эффекта реламинаризации. При осевом течении газа значение η менялось незначительно от скорости течения в разных точках в направлении движения потока и практически совпадало с радиальным вариантом при $Re \ge 2 \cdot 10^3$.

При анализе вихреобразования вблизи поверхности тел используют обобщенный параметр вихреобразования – число Струхаля, в виде:

$$\mathrm{Sh} = \frac{f \cdot d_{uu} \cdot \varepsilon}{U},\tag{5}$$

где f – частота, Гц; U – скорость в среднем сечении слоя, м/с.

Значения Sh существенно меняются для радиального течения потока от 0,62 до 0,11 с ростом Re (рисунок 5), это связано с проявлением эффекта реламинаризации при ускоренном течении. В опытах значение параметра реламинаризации *K* менялось в пределах $12 \cdot 10^{-6} \dots 35 \cdot 10^{-6}$ в зависимости от расхода воздуха, т. е. было выше порогового значения $K = 2 \cdot 10^{-6}$ проявления эффекта реламинаризации в данных условиях течения потока.

Измерения пульсаций давления в пяти точках слоя при радиальной и осевой схемах течения газа были обобщены в виде степенной зависимости:

$$Sh = 15.5 \cdot Re_r^{-0.6} \cdot \chi^{-1.3} \pm 11\%; Re_r = U_r d_{\rm m} / \nu,$$
(6)

где r – текущее значение радиуса в направлении ускорения течения потока в пределах $r_{\rm B} < r < r_{\rm H}$. Погрешность аппроксимации не превышала 8-11 %,



Рисунок 5 – Изменение числа Струхаля в зависимости от скорости потока: 1 – радиальная схема; 2 – осевая схема; 3 – одиночный шар

В четвертой главе описаны экспериментальные исследования теплообмена при радиальном течении потока газа в слое шаровых элементов. Значения коэффициента теплоотдачи определялись по нестационарной методике с предварительным нагревом медных шаровкалориметров, которые помещались между шарами слоя (рисунок 6).



Рисунок 6 – Схема измерения коэффициента теплоотдачи от шаракалориметра (а) и его размещения в слое (б): 1 – медный шар-калориметр; 2 – микровольтнаноамперметр или мультиметр; 3 – компьютер с аналогоцифровым преобразователем; 4 – Х-А термопара

Результаты экспериментального определения коэффициента теплоотдачи представлены на рисунке 7 в виде зависимости числа Нуссельта при радиальном течении Nu_r от числа Рейнольдса Re_r при разных положениях шара-калориметра относительно внутреннего радиуса

установки. Для сравнения на графике приведены данные, полученные Р.Г. Богоявленским (Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературых ядерных реакторах с шаровыми твэлами. М.: Атомиздат, 1978, 112 с.), М.Э.Аэровым и О.М. Тодесом (Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем. Л.: «Химия», 1968, 512 с.) для осевого течения.



Рисунок 7 – Зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи от числа Re_r при различном положении шара-калориметра относительно внутреннего радиуса установки r_e , r/r_e : а, $\bullet - 1,25$; б, $\blacktriangle - 3$; в, $\blacksquare - 4,2$; г, $\bullet - 4,8$; д, $\divideontimes - 0$ севое течение

Вблизи внутреннего (приемного) коллектора при $r/r_{e} = 1,25$ наблюдалось уменьшение интенсивности теплообмена на 15-20% по сравнению с областью $r/r_{e} = 4,2...4,8$ вблизи внешнего коллектора, что объясняется изменением характера течения и влиянием местного ускорения потока. В то же время показатель степени при местном числе Re_{r} менялся незначительно (0,62...0,63) для всей области значений $r_{e} < r < r_{h}$ и практически совпадал с соответствующими значениям для осевой схемы течения потока газа в слое.

При обобщении полученных результатов по теплообмену шаров различного диаметра получено соотношение, учитывающее факторы, связанные с особенностью радиального течения газа:

$$Nu_{r} = \frac{\alpha_{r}d_{III}}{\lambda} = 0.36 \frac{(1-\varepsilon)^{0.33}}{\varepsilon} \cdot \chi_{r}^{-1.6} Re_{r}^{0.62}; Re_{r} = \frac{G_{V}d_{III}}{2\pi Hr\nu}; \chi_{r} = 4\left(\frac{r}{r_{B}} + \frac{r_{B}}{r} + 2\right)^{-1}, (7)$$

где α_r – местное значение коэффициента теплоотдачи в области $r_{\rm B} < r < r_{\rm H}$; λ – коэффициент теплопроводности газа. Параметр χ_r учитывает влияние местного ускорения потока газа на характер течения, определяемый местным числом Рейнольдса Re_r.

Для уточнения условий возникновения эффекта реламинаризации и его роли в формировании гидравлического сопротивления и теплообмена были проведены эксперименты с ускоренным и замедленным радиальным течением газа в установке. Установлено, что интенсивность пульсаций статического давления η при замедленном течении всегда ниже, чем при ускоренном, особенно в области малых Re_r. Исследования теплообмена при ускоренном и замедленном течении потока (рисунок 8), подтверждают наличие эффектов реламинаризации и турбулизации при радиальном течении газа в шаровой засыпке.



Рисунок 8 – Изменение интенсивности теплоотдачи в шаровом слое от числа Re_F в зависимости от направления потока: 1 – ускоренное течение; 2 – замедленное течение

Было проведено исследование теплообмена труб в шаровом слое насадки при их поперечном обтекании газовым потоком. Получены соотношения для расчетов коэффициентов теплоотдачи:

– для ускоренного (конфузорного) радиального течения потока:

$$Nu_{rp} = Nu_0 \cdot [1 + 0.08(\eta \cdot Re_r)^{0.2}],$$
(8)

где $\eta = 2, 3 \cdot 10^{-4} \operatorname{Re}_{\bar{r}}^{1,3}$ при $\operatorname{Re}_{\bar{r}} = 100...350; \ \eta = 9, 1\operatorname{Re}_{\bar{r}}^{-0,52}$ при $\operatorname{Re}_{\bar{r}} = 350...10^3;$ – для замедленного (диффузорного) радиального течения потока:

$$Nu_{\rm rp} = Nu_0 \cdot [1 + 0.09(\eta \cdot Re_{\rm rp})^{0.22}], \tag{9}$$

где η =4,5·10⁻⁴ Re_{*r*}^{1,3} при Re_{*r*} = 100...350; η = 18,3 Re_{*r*}^{-0,52} при Re_{*r*} = 350...10³; Nu₀ = 0,52·Re_{тр}^{0,5}·Pr^{0,37}; Re_{тр} = $U_{\bar{r}} d_{\rm Tp} / \nu$; $d_{\rm Tp}$ – диаметр трубки, м. **В пятой главе** описаны методики расчета активной зоны реактора ВТГР и элементов энерготехнологической системы переработки природного газа с использованием результатов исследований. Система состоит из ядерной и технологической части с трёхконтурной тепловой схемой, представленной на рисунке 9.



Рисунок 9 – Принципиальная схема энерготехнологической системы с реактором ВТГР: 1 – ядерный реактор; 2 – промежуточный теплообменник; 3 – газодувка; 4 – конвертор метана; 5 – к системе производства синтез-газа; 6 – парогенератор; 7 – турбогенератор; 8 – конденсатор; 9 – насос; 10 – система регенерации теплоты

Первый контур состоит из реактора ВТГР, высокотемпературного промежуточного теплообменника (ПТО) и газодувки. Во второй контур ΠΤΟ, аппарат паровой конверсии входят метана С никелевым катализатором, парогенератор и газодувка второго контура. Третий контур включает в себя систему производства синтез-газа (на схеме не показана) и систему получения электрической энергии. Активная зона реактора ВТГР собой два коаксиальных перфорированных представляет цилиндра, пространство между которыми заполнено шаровыми твэлами, образующими в активной зоне реактора свободную засыпку. Исходные данные для расчета приведены в таблице 1. Расчет проводился для значений радиуса внутреннего коллектора $r_{\rm B} = 0, 4...2$ м по формулам (2, 3) для определения потерь давления и формулам (7, 8) для коэффициентов

теплоотдачи. На рисунке 10 приведены значения потерь давления и коэффициента гидравлического сопротивления в зависимости от *r*_в.

Параметр	Обозначение	Значение
Тепловая мощность, Вт	$Q_{men \pi}$	330·10 ⁶
Давление теплоносителя (гелия) на	P_{ex}	$5 \cdot 10^{6}$
входе в активную зону, Па		
Температура теплоносителя, °С		
на входе в активную зону	T _{ex}	500
на выходе из активной зоны	Твых	950
Диаметр шарового твэла, м	$d_{\iota\iota}$	0,06
Диаметр топливного сердечника, м	d_c	0,05
Удельная энергонапряженность	q_{v}	9,5·10 ⁶
активной зоны, Вт/м ³		

Таблица 1 – Исходные данные для расчета активной зоны



Рисунок 10 – Расчетные значения параметров активной зоыы

По результатам выбраны оптимальные значения внутреннего и наружного радиусов и высоты активной зоны. Результаты расчета первого контура приведены в таблице 2. Для сравнения в таблице даны результаты расчета активной зоны и первого контура ВТГР той же мощности с осевым течением теплоносителя.

Применение радиальной схемы течения позволяет сэкономить до 60% мощности, потребляемой газодувкой. Активная зона с осевой схемой течения имеет энергонапряженность $q_v^{\text{oc}} = (0,75...0,8)q_v^{\text{рад}}$, при одинаковой высоте $H_{\text{oc}} = H_{\text{рад}}$, так что ВТГР с радиальным течением имеет более компактную конструкцию. С другой стороны, расчет показывает, что

гидравлическое сопротивление ВТГР с осевым течением примерно в 7,5 раз выше из-за больших скоростей потока в межшаровом пространстве.

Параметр	Радиальная	Осевая
	схема	схема
Перепад давления в активной зоне, кПа	0,505	7,36
Перепад давления для первого контура, кПа	36,0	42,9
Температура перед газодувкой, °С	496,8	496,2
Мощность, потребляемая газодувкой, МВт	3,72	4,43
Мощность, передаваемая ПТО во второй	316,8	316,8
контур, МВт		

Таблица 2 – Результаты расчета первого контура

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

1. Впервые проведены комплексные экспериментальные исследования гидродинамических и теплообменных характеристик газового потока в слое шаровых элементов. при конфузорном и диффузорном его течении в установках с радиальной раздачей теплоносителя.

2. Выполнено моделирование течения газа в межшаровой области слоя методами вычислительной гидродинамики. Показано, что начало вихреобразования в условиях неизотермического течения смещается в область больших чисел Рейнольдса по сравнению с изотермическим характером течения. Получено соотношение, характеризующее переход от ламинарного к вихревому и турбулентному режимам течения газа в слое от превышения температуры поверхности шаров над температурой газа.

3. Установлено существенное отличие основных теплогидравлических параметров при радиальном течении газового потока в дисперсном шаровом слое по сравнению с осевой схемой течения, проявляющееся при кривизне поверхности наружного и внутреннего (раздающего и приемного) коллекторов $r_{\rm H}/r_{\rm B} \ge 1,25$.

4. Показано, что радиальная схема течения газового потока в слое характеризуется снижением гидравлического сопротивления в 2–3 раза по сравнению с осевой схемой течения как при ускоренном (конфузорном), так и при замедленном (диффузорном) течении потока.

5. Выявлены условия возникновения эффекта реламинаризации при градиентном течении газа в слое шаровых элементов, который сопровождается уменьшением относительной интенсивности пульсаций статического давления. Генерация крупномасштабных вихревых структур и частота их образования характеризуется числом Струхаля, значения которого почти линейно падают в направлении радиального течения потока, в то время как в случае осевого течения меняются незначительно.

6. В результате экспериментальных исследований получено соотношение, характеризующее изменение интенсивности теплообмена слоя с потоком газа в радиальном направлении течения. Помимо пористости слоя ε и местного числа Рейнольдса Re_r основным параметром для расчета критерия Нуссельта служит параметр χ_r, учитывающий относительную кривизну поверхности коллекторов и влияние ускорения потока газа.

7. Показано, что интенсивность теплообмена шарового слоя с газовым потоком при ускоренном его течении заметно меньше, чем при замедленном течении, что связано с проявлением эффектов реламинаризации или турбулизации в зависимости от направления течения потока в установке с радиальной схемой течения.

8. На основе полученных соотношений проведен теплогидравлический расчет активной зоны ядерного реактора ВТГР. Показана возможность реализации более компактной конструкции активной зоны с меньшим гидравлическим сопротивлением по сравнению с осевой схемой течения потока в слое тепловыделяющих элементов.

9. Получены экспериментальные соотношения для расчета коэффициентов теплоотдачи от цилиндрических элементов, помещенных в шаровой слой, которые позволяют рассчитывать конструктивные и режимные параметры установок с трубными пучками для энерготехнологических комплексов переработки природного газа.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. Перспективы дальнейшей разработки данной темы заключаются в исследовании возможности применения радиальной схемы течения для профилирования энерговыделения в активной зоне ВТГР с шаровыми твэлами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ

1. Климова В. А. Геометрические и гидродинамические характеристики ВТГР с радиальной раздачей теплоносителя / В. А. Климова, В. М. Пахалуев, С. Е. Щеклеин // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2009. – №1. – С. 130–134. 0,25 п. л. / 0,12 п. л.

 Климова В. А. Особенности гидродинамики и теплообмена шаровых твэлов при радиальном течении теплоносителя / В. А. Климова,
 В. М. Пахалуев, С. Е. Щеклеин // Известия высших учебных заведений.
 Ядерная энергетика. – 2009. – №4. – С.171–175. 0,26 п. л. / 0,13 п. л.

3. Климова В. А. Особенности вихреобразования при течении газового потока в слое шаровых элементов / В. А. Климова, В. М. Пахалуев, С. Е. Щеклеин // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2010. – № 7–8. – С. 14–19. 0,28 п. л. / 0,14 п. л.

4. Климова В. А. Численное моделирование и экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена при радиальном течении газа в слое шаровых элементов / В. А. Климова, В. М. Пахалуев, С. Е. Щеклеин // Теплоэнергетика. – 2011. – №4. – С. 52–56. 0,39 п. л. / 0,13 п. л.

5. **Klimova, V. A.** Production of a reducing environment for metallurgy using nuclear energy / V. A. Klimova, V. M. Pakhaluev, S. E. Shcheklein // WIT Transactions on Ecology and The Environment. -2014. - Vol 190. - № 2. - Pp. 935-941. 0,35 п. л. / 0,18 п. л. (Scopus)

6. **Klimova, V. A.** On the problem of efficient production of hydrogen reducing gases for metallurgy utilizing nuclear energy / V. A. Klimova, V. M. Pakhaluev, S. E. Shcheklein // International journal of Hydrogen Energy. – 2016. – Vol. 41(5). – Pp. 3320-3325. 0,36 п. л. / 0,18 п. л. (Scopus, WoS)

7. Starikov E.V. Study of natural convection development in narrow vertical channels / E. V. Starikov, **V. A. Klimova**, S. E. Shcheklein // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1105(1). – 012005. – Pp. 1–6. 0,37 п. л. / 0,12 п. л. (Scopus)

8. Abed, A.H. On the possibility to improve heat transfer of a sphere by natural convection and water mist / A. H. Abed, V. A. Klimova, S. E.

Shcheklein, V. M. Pakhaluev // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1382(1). – Article number 012124. 0,37 п. л. / 0,1 п. л. (Scopus, WoS)

9. Ташлыков О.Л. Расчетно-экспериментальные исследования гидродинамических условий работы фильтров-контейнеров для ионоселективной очистки / О. Л. Ташлыков, И. А. Бессонов, А. Д. Лезов, С. В. Чалпанов, М. С. Смыков, Г. И. Скворцов, В. А. Климова // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2022. – № 2. – С. 62-72. 0,67 п. л. / 0,1 п. л.

Другие публикации

10. Климова В. А. Экологический эффект применения ВТГР в качестве энергоисточника промышленных процессов / В. А. Климова // Безопасность критичных инфраструктур и территорий: материалы III Всероссийской научно-технической конференции и XIII школы молодых ученых, 10-13 ноября 2009 г. – Екатеринбург, УрО РАН, 2009. – С. 404–405. 0,13 п. л. / 0,13 п. л.

11. Климова В. А. Хемотермический транспорт тепловой энергии, вырабатываемой на АЭС / В. А. Климова // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады 16-19 ноября 2009 г., научно-практической конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых 14-18 декабря 2009 г. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009. – С. 536–537. 0,1 п. л. / 0,1 п. л.

12. Климова В.А. Ядерный энергоисточник для производства водорода /
В. А. Климова, С.Е. Щеклеин // Энергетика настоящего и будущего: сборник материалов I Евроазиатской выставки и конференции 16-18 февраля 2010 г. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2010. – С. 65–67. 0,12 п. л. / 0,06 п. л.

13. Климова В. А. Атомная станция дальнего теплоснабжения на базе конверсии метана / В. А. Климова // Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых 22-26 ноября 2010 г. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – С.357–359. 0,21 п. л. / 0,21 п. л.

14. Климова В. А. ВТГР с радиальной раздачей теплоносителя для / энергообеспечения технологических процессов В. А. Климова, В. М. Пахалуев // Энергетика XXI века. Техника, экономика и подготовка всероссийской Сборник материалов научно-практической кадров: конференции, посвященной 50-летию кафедры «Атомная энергетика» УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина 6-8 октября 2011 г. В 2-х частях. Ч. 1. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – С.92–100. 0,3 п. л. / 0,2 п. л.

15. Булыгин А. А. Конвертор метана с гелиевым теплоснабжением от ВТГР / А. А. Булыгин, **В. А. Климова** // Энергетика XXI века. Техника, экономика и подготовка кадров: Сборник материалов всероссийской научно-практической конференции, посвященной 50-летию кафедры «Атомная энергетика» УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина 6-8 октября 2011 г. В 2-х частях. Часть 1. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – С. 83-89. 0,25 п. л. / 0,12 п. л.

16. Климова В. А. Компьютерное моделирование и экспериментальное исследование процессов реламинаризации и турбулизации при радиальном течении газа в слое шаровых элементов / В. А. Климова, В. М. Пахалуев // В сборнике трудов всероссийской междисциплинарной молодежной научной конференции «Информационная школа молодого ученого», Екатеринбург, 5–9 сентября 2011 г. – Екатеринбург, ЦНБ УрО РАН, 2011. – С. 220–232. 0,32 п. л. / 0,2 п. л.

17. Климова В. А. Энерготехнологическая система дальнего атомного теплоснабжения с установками радиального течения газовых потоков / В. А. Климова, В. М. Пахалуев // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2012. – №3(107). – С. 26–30. 0,42 п. л. / 0,2 п. л.

18. Климова В. А. Комплексная переработка природного газа в установках с использованием теплоты ВТГР и радиальной схемы течения потоков / В. А. Климова, В. М. Пахалуев, С. Е. Щеклеин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – №14(154). – С. 85–93. 0,55 п. л. / 0,25 п. л.

19. Климова В. А. Исследование теплогидравлических характеристик применительно проблеме газовых потоков К создания ядернотехнологических комплексов / В. А. Климова, В. М. Пахалуев // В сборнике трудов всероссийской междисциплинарной молодежной научной Информационная конференции «IV школа молодого ученого»,

Екатеринбург, 25–29 августа 2014 г. – Екатеринбург, ЦНБ УрО РАН, 2014. – С. 237–246. 0,3 п. л. / 0,2 п. л.

20. Климова В. А. Установка для экспериментальной верификации результатов компьютерного моделирования гидродинамики обтекания тел вращения газовыми потоками / В. А. Климова, Ю. Е. Немихин, С. Е. Щеклеин // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – №8-9(172-173). – С. 33–40. 0,45 п. л. / 0,15 п. л.

21. Никитин А. Д. Использование PIV-метода для верификации моделей обтекания тел вращения / А. Д. Никитин, **В. А. Климова**, С. Е. Щеклеин // Труды Первой научно-технической конференции молодых ученых уральского энергетического института, Екатеринбург, 16–20 мая 2016 г. – Екатеринбург, УрФУ, 2016. – С. 160–162. 0,12 п. л. / 0,03 п. л.

22. Tashlykov O. L. Ecological and economic advantages of remote heat supply from reactor plant of advanced safety BN-1200 / O. L. Tashlykov, **V. A. Klimova**, S. E. Shcheklein, S. A. Popov // В книге: ASRTU-2018 Abstract book. Proc. of Sino-Russian ASRTU Conference "Alternative Energy: Materials, Technologies and Devicesconference", Екатеринбург, 9-16 июля 2018 г. – Екатеринбург, 2018. – С. 14-15. 0,12 п. л. / 0,02 п. л.

23. Бессонов И. А. Оценка использования программного пакета Comsol Multiphysics для исследования течения в пористых телах / Бессонов И. А., Бреусова А. А., Кораблев Д. А., Климова В. А., Ташлыков О. Л. // В сборнике: Х Информационная школа молодого ученого. Сборник научных трудов. Екатеринбург: Центральная научная библиотека УрО РАН, 2022. – С. 488–497. 0,32 п. л. / 0,12 п. л.

24. Abed A. Water-air aerosol cooling of rows of cylindrical elements under conditions of natural convection / A. Abed, S. Shcheklein, **V. Klimova** // В сборнике: XXXIX Siberian Thermophysical Seminar (STS-39). Collection of conference materials. – 2023. – Volume 459. – Les Ulis, 2023. – C. 04021. 0,42 п. л. / 0,12 п. л.