

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого
Президента России Б. Н. Ельцина»
Уральский энергетический институт
Кафедра атомных станций и возобновляемых источников энергии

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

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д. т. н., профессор Сергей Евгеньевич Щеклеин

Екатеринбург – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ.....	12
1.1 Высокотемпературные ядерно-энергетические установки	12
1.2 Использование ВТГР в составе ядерно-технологического комплекса для производства водорода и водородсодержащих газов.....	18
1.3 Теплообмен и течение газа в шаровом слое (засыпке) активной зоны ВТГР	23
1.3.1 Течение газового потока в шаровой засыпке	25
1.3.2 Теплообмен газового потока в шаровой засыпке	29
1.3.3 Радиальное течение газа в установках с шаровым слоем	31
1.4 Явление реламинаризации газового потока в каналах с конфузурной конфигурацией.....	33
1.5 Выводы и основные задачи исследований	36
2 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ГАЗА В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ.....	39
2.1 Вычислительная гидродинамика. Моделирование турбулентных течений .	39
2.2 Моделирование обтекания одиночного шара потоком газа в изотермических условиях	43
2.3 Моделирование обтекания шарового элемента в слое.....	45
2.4 Моделирование течения газа в элементарной шаровой ячейке	48
2.5 Выводы к разделу 2.....	51
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИКИ ПРИ РАДИАЛЬНОМ ТЕЧЕНИИ ПОТОКА ГАЗА В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ	53

3.1	Планирование экспериментальных исследований и создание экспериментальной установки.....	53
3.2	Описание экспериментальной установки.....	54
3.2.1	Конструкция насадки с шаровыми элементами.....	54
3.2.2	Измерение расхода воздуха через насадку с шаровыми элементами.....	56
3.2.3	Измерение перепада давления при течении воздуха через насадку с шаровыми элементами.....	59
3.2.4	Измерение пульсаций статического давления	60
3.3	Определение коэффициента гидравлического сопротивления в условиях радиального течения газа	61
3.4	Исследования пульсаций статического давления потока в шаровой засыпке	65
3.5	Выводы к разделу 3.....	72
4	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАДИАЛЬНОМ ТЕЧЕНИИ ПОТОКА ГАЗА В ЗЕРНИСТОМ СЛОЕ.....	74
4.1	Описание экспериментальной установки и методики измерения коэффициента теплоотдачи.....	74
4.2	Исследование теплоотдачи от шара-калориметра в засыпке с радиальным течением газа	77
4.3	Влияние направления течения при радиальной схеме течения газового потока.....	80
4.4	Особенности теплообмена труб в шаровом слое насадки при их поперечном обтекании газовым потоком.....	84
4.5	Анализ погрешностей обработки экспериментальных данных	87
4.6	Выводы к разделу 4.....	89
5	Методика теплогидравлического расчета активной зоны реактора ВТГР в составе энерготехнологического комплекса переработки природного газа.....	90

5.1. Использование ВТГР в составе ядерно-технологического комплекса для производства водорода и водородсодержащих газов.....	90
5.2 Определение основных теплогидравлических характеристик реактора ВТГР с радиальной раздачей теплоносителя в качестве источника теплоты	95
5.3 Определение гидравлического сопротивления первого контура энерготехнологической установки с реактором ВТГР с радиальным течением теплоносителя.....	101
5.4 Оценка параметров установки переработки природного газа с радиальным течением потоков в дисперсном слое	105
5.5 Принципиальная схема энерготехнологической системы на основе получения синтез-газа.....	112
5.6 Выводы к разделу 5.....	113
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	114
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	116
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	117
Приложение А	133
Приложение Б	141
Приложение В.....	143
Приложение Г	146
Приложение Д.....	148

ВВЕДЕНИЕ

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), включенные в Поколение IV [1 – 3]. Интерес к ВТГР обусловлен возможностью получать в этих установках температуру газового теплоносителя до 950–1000 °С и использовать ЯЭС с ВТГР для производства электроэнергии в газотурбинном термодинамическом цикле, а также как источник теплоснабжения промышленных производств.

Внедрение ЯЭС с ВТГР в энергоснабжение технологических процессов возможно как непосредственно, в качестве источника высокопотенциальной теплоты, так и при помощи выработки вторичного энергоносителя – водорода или синтез-газа (смеси водорода с СО) [2, 4 – 6]. Теплота ядерного реактора замещает теплоту сгорания органических топлив, в результате чего не только решается проблема экономии топлива и понижения энергоемкости продукции, но и снижается экологическая нагрузка, а именно – выбросы парниковых газов [7].

К настоящему времени накоплен солидный опыт эксплуатации исследовательских и опытно-промышленных ВТГР [1, 8, 9], в результате чего выявлены две основные концепции конструкции – активная зона с шаровыми твэлами, представляющая собой свободную засыпку, и активная зона со стержневыми или призматическими твэлами. Для энерготехнологического применения ВТГР с шаровой засыпкой предпочтительнее, так как перегрузку топлива можно осуществлять «на ходу» [2, 4, 10, 11].

Однако технология ВТГР с шаровой засыпкой имеет ряд не решенных к настоящему времени проблем, не последнее место среди которых занимает высокое гидродинамическое сопротивление шаровой засыпки [8, 10, 12]. Традиционно гелиевый теплоноситель движется между шаровых твэлов в осевом направлении, преодолевая слой толщиной в несколько метров [9, 13]. При выборе схемы с ради-

альным течением газового потока внутри дисперсного слоя твэлов появляется возможность реализации более компактной конструкции реактора с меньшими гидравлическими потерями на перекачку теплоносителя [14]. 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 [15 – 18]. Таким образом, исследование гидродинамики 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 [19 – 23]. Изучено радиальное течение газа или жидкости применительно к аппаратам химической технологии, особенностью которых является низкая скорость течения. Однако при радиальном течении со скоростями, характерными для энергетических установок, возникают эффекты, которые оказывают существенное влияние на взаимодействие потока газа с засыпкой [17]. В области ядерной энергетики радиальное течение теплоносителя в слое шаровых элементов рассматривалось применительно к микротвэльным тепловыделяющим сборкам водо-водяных энергетических реакторов, например, в работах [24 – 26], а также в работах [27 – 29]. Однако 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 диссертационной работы является повышение энергетической эффективности и совершенствование конструкции ВТГР и элементов энерготехнологического комплекса на базе ВТГР с радиальным течением теплоносителя.

Для достижения этой цели ставились следующие **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 газового потока.

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.

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 имени первого Президента России Б. Н. Ельцина.

Научная новизна работы состоит в том, что

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 $r_{\text{в}}/r_{\text{в}} \geq 1,25$ 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.

Теоретическая значимость. Полученные результаты диссертационного исследования расширяют представление о течении потоков газа сквозь слой шаровых элементов в изотермических и неизотермических условиях. 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 тепловыделения и конструктивных особенностей установки 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.

Материалы исследования использованы при разработке курсов «Атомные электрические станции», «Компьютерное моделирование физических процессов», «Основы научных исследований в ядерной энергетике» и лабораторных работ для подготовки студентов УрФУ направления подготовки 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг».

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 энерготехнологических 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 г.), XV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ (Екатеринбург, 2008 г.), XVI Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники (Екатеринбург, 2009 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2009 г.), Международном научном молодежном симпозиуме «Безопасность биосферы 2009» (Екатеринбург, 2009 г.), III Всероссийской научно-технической конференции «Безопасность критичных инфраструктур и территорий» (Екатеринбург, 2009 г.), XVII Уральской международной конференции молодых ученых по приоритетным направлениям развития науки и техники (Екатеринбург, 2010 г.), IX Международной научно-практической конференции «Проблемы и достижения в промышленной энергетике» (Екатеринбург, 2010 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» (Екатеринбург, 2010 г.), I Евроазиатской выставки и конференции «Энергетика настоящего и будущего» (Екатеринбург, 2010 г.); Энергетика XXI века. Техника, экономика и подготовка кадров (Екатеринбург, 2011); Всероссийская междисциплинарная молодежная научная конференция «Информационная школа молодого ученого» (Екатеринбург, 2011 г.); First International Conference On Energy Production and Management in the 21st Century: the Quest for Sustainable Energy (Екатеринбург, 2014 г.); Всероссийская междисциплинарная молодежная научная конференция «IV Информационная школа молодого ученого» (Екатеринбург, 2014 г.); Первая научно-техническая конференция молодых ученых уральского энергетиче-

ского института (Екатеринбург, 2016 г.); X Информационная школа молодого ученого (Екатеринбург, 2022); International Conference "Energy, Ecology, Climate 2025 – WCAEE-ICEEC-2025» (Черногория, Будва, 2025 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 статей в рецензируемых научных журналах, в том числе 5 статей в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК РФ и 4 статьи в изданиях, индексируемых Scopus и WoS, а также 15 работ в сборниках материалов конференций.

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.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОБЛЕМЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

1.1 Высокотемпературные ядерно-энергетические установки

В рамках Международного форума Поколения IV, к которому Российская Федерация присоединилась в 2006 г., намечено шесть перспективных ядерно-энергетических систем (ЯЭС) [1, 3]. Одна из этих систем основана на высокотемпературных реакторах с гелиевым теплоносителем и графитовым замедлителем (ВТГР, VHTR или HTGR), основным предназначением которых является обеспечение тепловой энергией промышленных процессов, например производства водорода. Технология ВТГР опирается на реализованные в 1970-е-80-е годы в Великобритании, Германии, США проекты [1, 9, 30–32], которые показали за время эксплуатации надежность, способность длительно нагревать гелий до 950–1000° С, высокий уровень безопасности. Эти установки наметили основные пути развития ЯЭС с ВТГР:

- использование газовой турбины с закрытым циклом;
- применение высокотемпературного тепла для технологических целей.

Интерес к этому направлению возобновился на рубеже веков: в 1998 г. пущен экспериментальный реактор HTTR в Японии, в 2003 г. – HTR-10 в Китае [1, 33], эксплуатируются в настоящее время. В Китае с 2012 г. сооружается демонстрационная установка типа HTR-PM мощностью 200 МВт(э), первый блок которой подключен к сети в декабре 2021 г. [11, 34].

Существует два варианта конструкции активной зоны ВТГР: блочная с призматическими или стержневыми ТВЭлами и насыпная с шаровыми ТВЭлами [1, 10, 35, 36]. Шаровой ТВЭЛ (рисунок 1.1) содержит как делящийся, так и воспроизводящий материал, например оксид урана или уран-ториевый карбид в микрочастицах, диспергированных в графитовой матрице – ядерных ядрах [1, 37]. Ядра имеют многослойное керамическое покрытие (т. н. оболочка TRISO и BISO [9]), которое предотвращает выход газообразных продуктов деления, защищает графитовую матрицу ТВЭЛА от разрушения, уменьшает диффузию и миграцию топлива при вы-

соких температурах активной зоны, т. е. выполняет функции барьеров безопасности [38, 39]. Диаметр микрочастиц топлива 0,2–0,8 мм. В одном шаровом твэле в графитовой матрице содержится до 35 000 микротвэлов, покрытых оболочкой из пиролитического углерода толщиной около 5 мкм.

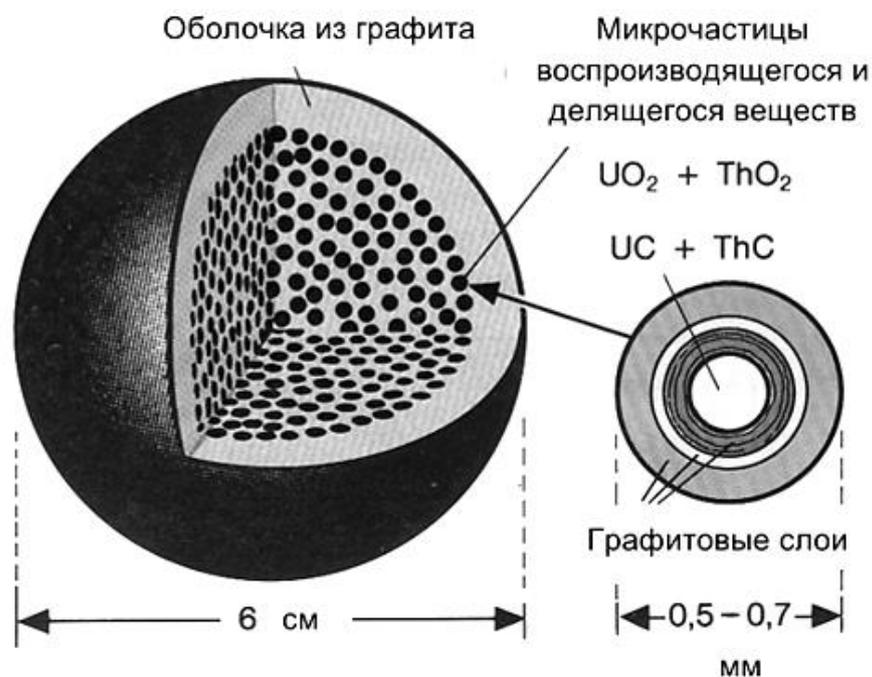


Рисунок 1.1 – Шаровой твэл ВТГР с оболочкой TRISO [35]

Гелий как теплоноситель ВТГР выбран по совокупности ядерно-нейтронных и теплофизических свойств [40]. Теплоемкость гелия в диапазоне температур от 0 °С до 1000 °С практически постоянна и равна 5,193 кДж/(кг·К). Объемная теплоемкость гелия невелика, поэтому для аккумуляции значительного количества тепла в гелии необходимо иметь большой перепад температур на входе и выходе реактора. Этот недостаток компенсируется относительно большой теплопроводностью – 0,146 Вт/(м·К) при нормальных условиях. Вязкость гелия близка к вязкости других газовых теплоносителей. Стоимость гелия относительно невысока [10, 41].

На рисунке 1.2 показаны варианты конструкции активной зоны ВТГР с шаровыми (а) и призматическими (б) твэлами на примере НТР-РМ [13, 42] и GTNTR-300 [43–45].

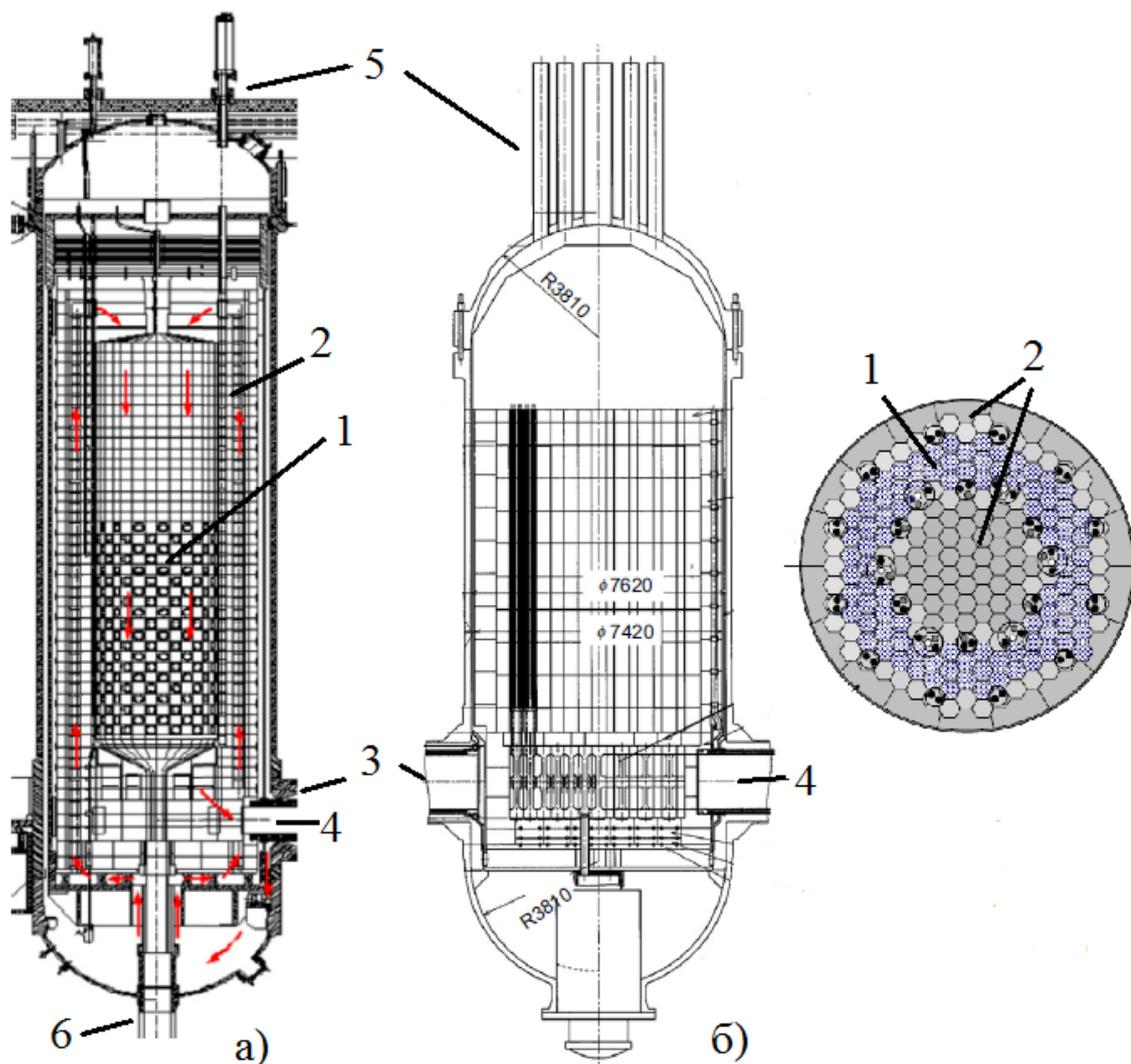


Рисунок 1.2 – Варианты конструкций ВТГР: а) с шаровыми ТВЭлами [13]; б) с призматическими ТВЭлами [45]; 1 – активная зона; 2 – отражатель; 3 – вход холодного газа; 4 – выход горячего газа; 5 – привод СУЗ; 6 – трубопровод для выгрузки отработавших ТВЭлов

Активная зона ВТГР с шаровыми ТВЭлами представляет собой свободную засыпку, окруженную графитовым отражателем; возможен вариант с кольцевой активной зоной, как в проекте RBMR [46, 47]. Рассматривались также проекты ВТГР в корпусе из предварительно напряженного железобетона, например, ВГР-400 [48]. В таблицах 1.1–1.2 описаны примеры реализованных и разрабатываемых проектов ВТГР.

Таблица 1.1 – Исследовательские и опытно-промышленные ЯЭУ с ВТГР [1, 9, 30, 52]

Параметр	ЯЭУ						
	Peach Bottom (США)	Dragon (Вели- кобритания)	AVR (Германия)	HTTR (Япония)	HTR-10 (Китай)	Fort St. Vrain (США)	THTR (Германия)
Тепловая / электриче- ская мощность, МВт	115 / 40	20 / –	46 / 15	30 / –	10 / –	842/330	750/300
Топливный элемент	Стержневой	Стержневой	Шаровой	Стержневой	Шаровой	Стержневой	Шаровой
Топливо	Карбидное	Оксидное	Карбидное или оксидное	Оксидное	Оксидное	Карбидное	Оксидное
Оболочка ТВЭЛ	BISO	TRISO	BISO/TRISO	TRISO	TRISO	TRISO	BISO
Энергонапряжен- ность, МВт(тепл.)/м ³	8,3	14	2,6	2,5	2	6,3	6
Температура гелия на входе/выходе, °С	377 / 750	350 / 750	270 / 950	385 / 850 и 950	250 / 700 и 350 / 900	405 / 784	270 / 750
Среднее давление ге- лия, МПа	2,5	2	1	4	3	4,5	3,9
Годы работы	1967–1974	1968–1975	1967–1988	1998 – по наст. время	2000 – по наст. время	1976–1989	1986–1989

Таблица 1.2 – Некоторые проекты ЯЭУ с ВТГР [1, 9, 13, 42–44, 48, 53–56]

Параметр	Проект				
	ГТ-МГР	ВГ-400	PBMR	HTR-PM	GTHTR-300C
Тепловая / электрическая мощность, МВт	600 / 285	1060 / 300	400 / 165	2x250 / 200	600 / 274
Топливный элемент	Призматический	Шаровой	Шаровой	Шаровой	Призматический
Топливо	МОКС	Оксидное	Оксидное	Оксидное	Оксидное
Оболочка ТВЭЛ	TRISO	TRISO	TRISO	TRISO	TRISO
Энергонапряженность, МВт(тепл.)/м ³	6,5	–	4,8	3,215	5,4
Температура гелия на входе/выходе, °С	510 / 850	350 / 950	500 / 900	250 / 700	594 / 950
Давление гелия, МПа	7,0	5	9	7	5,1
Материал корпуса	Сталь 10Х9МФБ	ПНЖБ	Сталь	Сталь	Сталь
Назначение	Производство электроэнергии (ГТУ, к.п.д. 47,7 %)	Производство электроэнергии	Производство электроэнергии (ГТУ, к.п.д. 42,2 %)	Производство электроэнергии (ПТУ, к.п.д. 40 %)	Производство электроэнергии (ГТУ), производство водорода

Тепловая схема ЯЭУ с ВТГР может быть одно- или двухконтурная, и ее состав во многом определяется назначением установки. Рассматриваются следующие варианты производства электроэнергии [49–51]:

- в паротурбинном цикле: схема АЭС двухконтурная, гелий первого контура передает тепло к рабочему телу паротурбинной установки в парогенераторе;

- в замкнутом газотурбинном цикле (цикле Брайтона): сжатый компрессором гелий подается в ядерный реактор, который в этой схеме играет роль нагревателя, и затем в турбину. Совершивший работу газ поступает в охладитель – теплообменный аппарат, в котором теплота отводится к охлаждающей воде или воздуху. Тепловая схема такой установки может быть одноконтурной;

- в комбинированном цикле, когда горячий гелий после реактора направляется в газовую турбину, а после совершения работы поступает в парогенератор, где использует остаточное тепло на нагрев и испарение воды. Пар совершает работу в паровой турбине. Первый контур такой установки – гелиевый, состоит из ядерного реактора, газовой турбины, парогенератора и компрессора, а второй контур – контур паротурбинной установки.

На рисунке 1.3 показана принципиальная схема и T-S-диаграмма ВТГР с прямым газотурбинным циклом. Согласно расчетам [51, 54], КПД подобных установок может достигать 45–47 %. Рассматриваются варианты с комбинированным циклом, в котором отработавший газ после газовой турбины проходит через парогенератор, производя пар для использования в паровой турбине [50].

ВТГР с газотурбинной установкой позволяет получить более высокий по сравнению с легководными АЭС КПД и снизить тепловое загрязнение окружающей среды. Но основной целью этого направления является внедрение ядерной энергии в обеспечение высокопотенциальной теплотой промышленных процессов, в частности, в производство водорода и водородсодержащих газов.

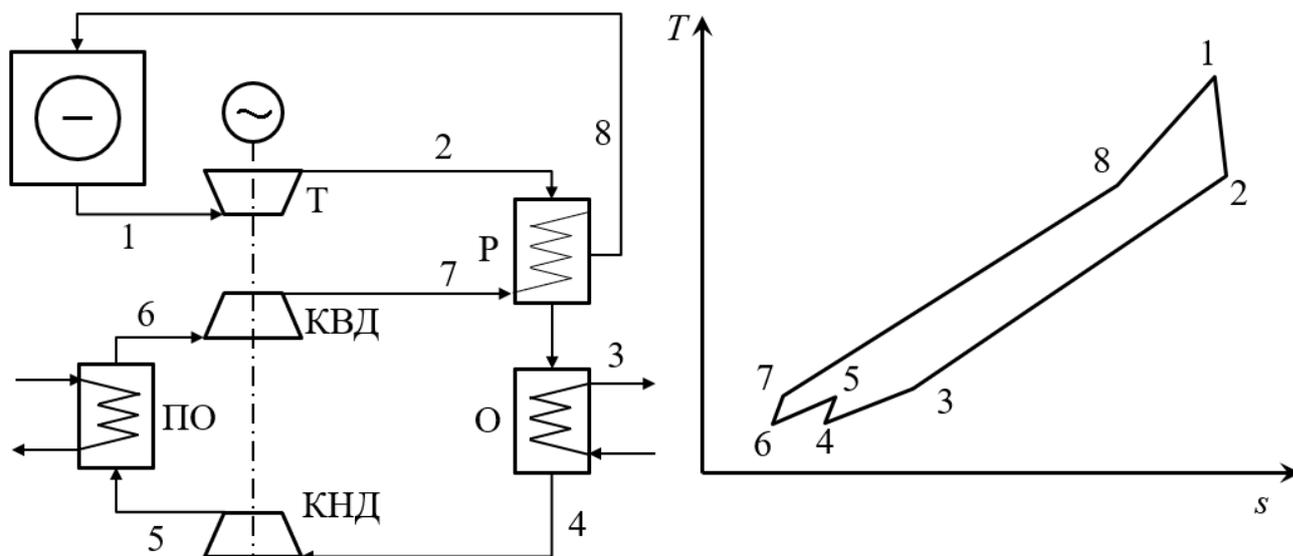


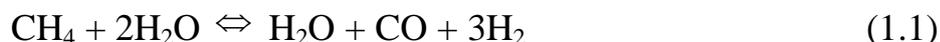
Рисунок 1.3 – Принципиальная схема и T-S-диаграмма ВТГР с прямым газотурбинным циклом: 1–2 – гелиевая турбина (Т); 2–3 – сторона низкого давления рекуператора (Р); 3–4 – охладитель (О); 4–5 – компрессор низкого давления (КНД); 5–6 – промежуточный охладитель (ПО); 6–7 – компрессор высокого давления (КВД); 7–8 – сторона высокого давления рекуператора; 8–1 – активная зона ВТГР

1.2 Использование ВТГР в составе ядерно-технологического комплекса для производства водорода и водородсодержащих газов

Интерес к водородной энергетике в настоящее время обусловлен как необходимостью замещения ископаемых топлив, так и обостряющимися экологическими проблемами. Водород – это перспективный энергоноситель с высоким удельным энергосодержанием, который можно использовать для накопления, хранения и транспортировки энергии [57]. Для производства водорода в основном используют конверсию углеводородов, и лишь небольшую долю рынка обеспечивает электролиз [58].

Согласно [57], производство водорода методом паровой конверсии природного газа с использованием тепловой энергии атомной энерготехнологической станции с обеспечением улавливания углекислого газа считается низкоуглерод-

ным. Природный газ более чем на 90 % состоит из метана [59], при паровой конверсии которого протекает несколько химических реакций. Суммарно их представляют в виде эндотермической реакции



с тепловым эффектом 12 908 кДж/кг исходного метана, которая проводится с использованием никелевого катализатора при температуре 700 – 900°C или при 1300–1400°C без катализатора; и экзотермической реакции



с тепловым эффектом 2576 кДж/кг исходного метана, которая протекает на железохромовом катализаторе при температуре ~400°C [5].

В химической технологии паровую конверсию метана проводят в трубчатых печах и шахтных конвертерах. На рисунке 1.4 показана принципиальная схема ядерно-технологического комплекса для паровой конверсии метана, разработанная для исследования возможности производства водорода на экспериментальном реакторе НТР-10 [60].

Электролиз воды с использованием электроэнергии АЭС также является низкоуглеродным способом. В [61] рассматривается возможность электролиза на АЭС в периоды провала электрической нагрузки, однако при этом требуются электролизные установки повышенной мощности, способные выдерживать частые пуски и остановки в процессе эксплуатации, и крупномасштабные хранилища с возможностью ежедневной закачки и отбора водорода. С точки зрения энергозатрат перспективным представляется высокотемпературный электролиз водяного пара, который производят при температуре 1073...1273 К [62].

На исследовательской ЯЭУ НТТР исследуются возможности производства водорода путем термохимического разложения воды в йодно-серном (iodine-sulphur, IS) процессе [5, 63–64], состоящем из трех стадий:

1. $\text{SO}_2 + \text{I}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + 2\text{HI} + Q$ (диапазон температур 30...120 °C)
2. $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 + 0,5\text{O}_2 - Q$ (диапазон температур 830...900 °C)
3. $2\text{HI} \rightarrow \text{H}_2 + \text{I}_2 + Q$ (диапазон температур 320...450 °C).

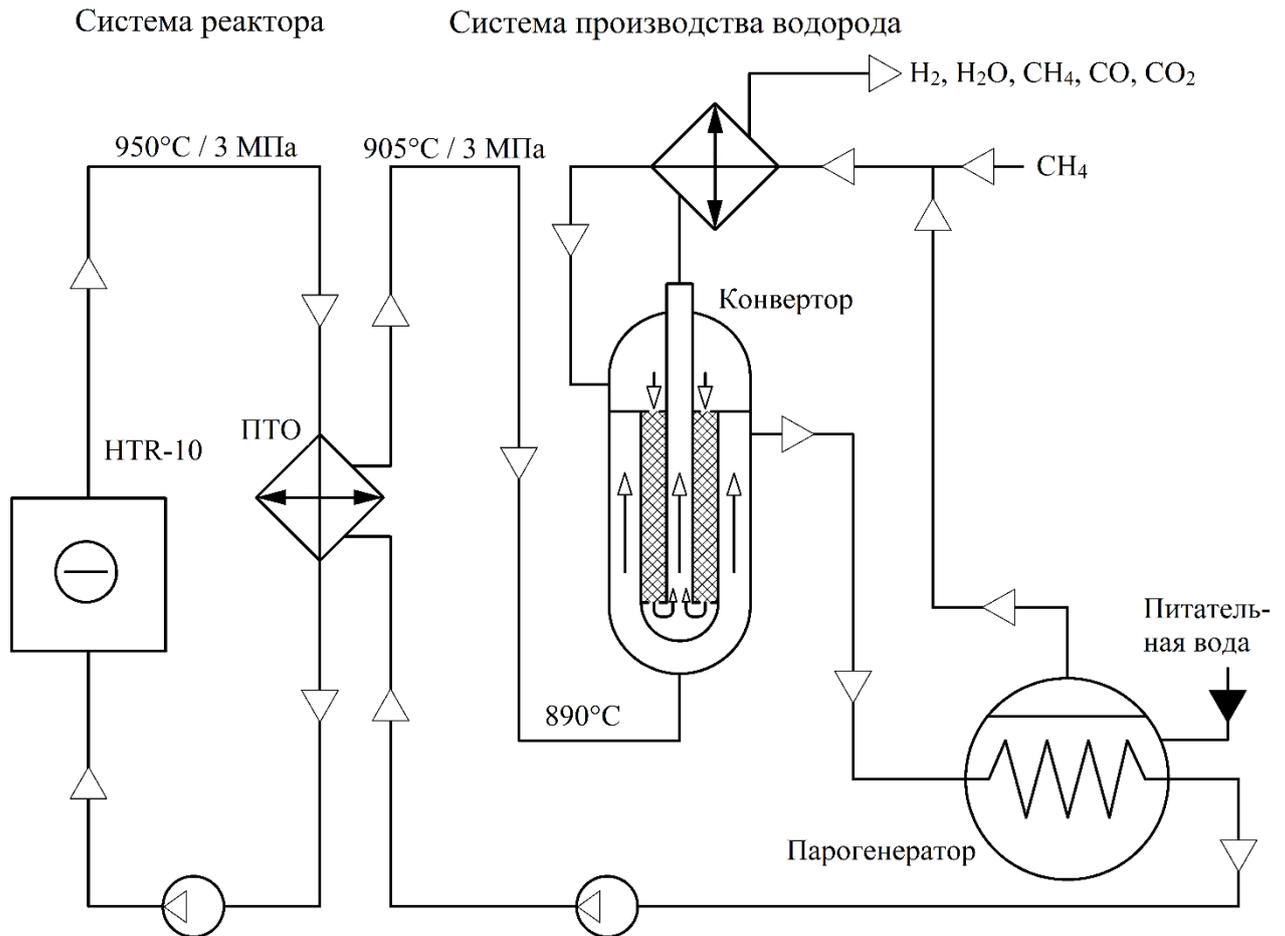


Рисунок 1.4 – Схема производства водорода с HTR-10

Здесь Q – выделившаяся или поглощенная теплота.

При термохимическом разложении воды, т. е. разложении воды под действием тепла в некотором химическом процессе с участием рециркулирующих агентов, последовательность химических реакций выполняет следующие функции [62]: а) связывание воды; б) отщепление продуктов (водорода и кислорода); в) регенерацию реагентов. Термохимический цикл должен удовлетворять таким критериям, как эффективность процесса, доступность и относительная дешевизна реагентов, возможность разделения продуктов реакций. Для атомной энергетики рассматривается несколько циклов [5, 6, 62, 65], в том числе йодно-серный процесс, описанный выше. Согласно оценкам [1], его термический КПД 48,6 %.

На рисунке 1.5 приведена принципиальная схема производства водорода в IS-процессе параллельно с производством электроэнергии [66]. Гелий после реактора поступает в промежуточный теплообменник ПТО, где передает тепло гелию

второго контура (теплоносителю в установке производства водорода), а потом направляется в газовую турбину.

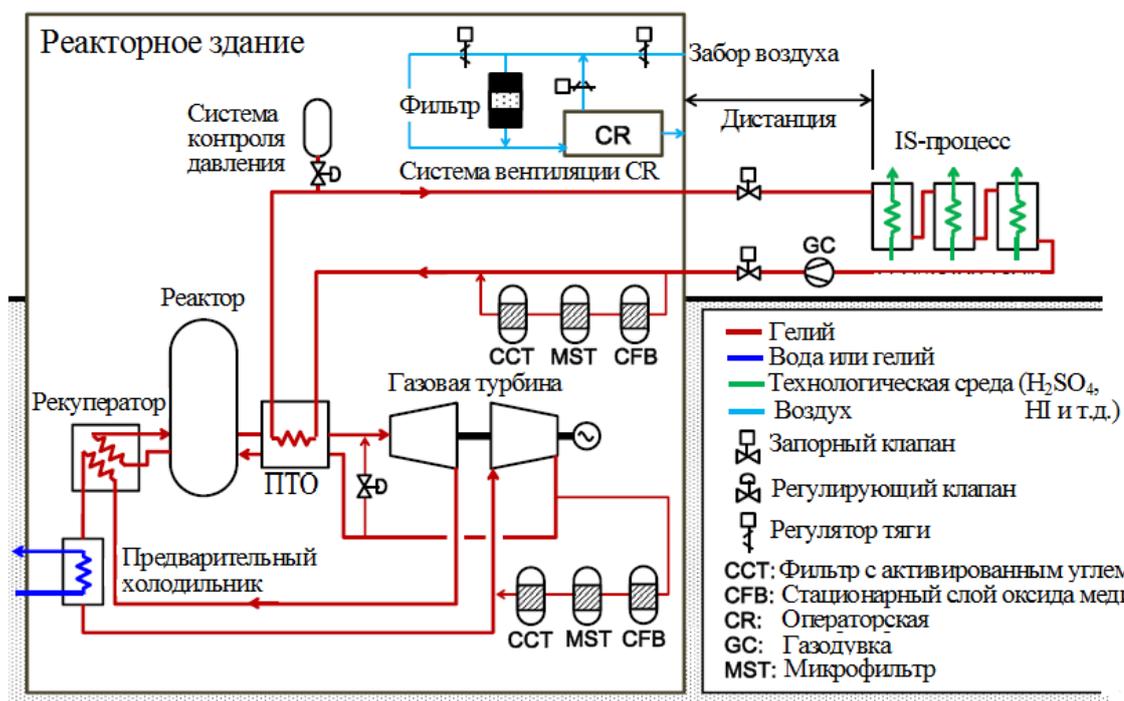


Рисунок 1.5 – Принципиальная схема производства водорода в IS-процессе с теплоснабжением от ВТГР

Природный газ, состоящий из метана (92 – 98 %) и его гомологов [59], является универсальным исходным сырьем для производства многочисленных продуктов органического синтеза. Все способы его переработки базируются на каталитических процессах, где в качестве исходного продукта переработки служит синтез-газ (смесь H_2 и CO), который используется в дальнейшем для получения метанола, диметилового эфира (ДМЭ), этанола и других продуктов синтеза [67]. Синтетические моторные топлива, которые могут быть получены из природного газа, вызывают в настоящее время интерес в связи с дефицитом нефти и экологическими проблемами. Например, ДМЭ как моторное топливо имеет выхлоп, не содержащий серы и сажи, и практически без оксидов азота [68].

Первой стадией процесса переработки природного газа в синтетическое топливо является получение синтез-газа. Один из основных методов его получения – паровая конверсия метана в конверсионной печи при температуре 800–900 °C в

присутствии дисперсного катализатора [62]. Дальнейший технологический маршрут синтез-газа зависит от выбора процесса его вторичной переработки. Охлажденная смесь H_2 и CO после отделения воды может транспортироваться по трубопроводу потребителям, где в соответствующих химических реакторах получают метанол, ДМЭ, этан, моторное топливо и другие продукты.

ЯЭС с ВТГР способна обеспечивать высокотемпературной теплотой (800–1000 °С) установку для конверсии метана [4]. В этом случае синтез-газ, получаемый в ядерно-технологическом комплексе (ВТГР + паровая конверсия CH_4), транспортируется к месту его переработки в конечные продукты синтеза.

Также синтез-газ может использоваться напрямую, например, для прямого получения железа из руды [69]. На рисунке 1.6 показана схема производства стали, в которой ВТГР с температурой 950° С на выходе служит источников электроэнергии и тепла [70, 71]. Тепло от ВТГР используется для разложения воды на водород и кислород, которые служат топливом и реактивами для прямого восстановления металла из руды.

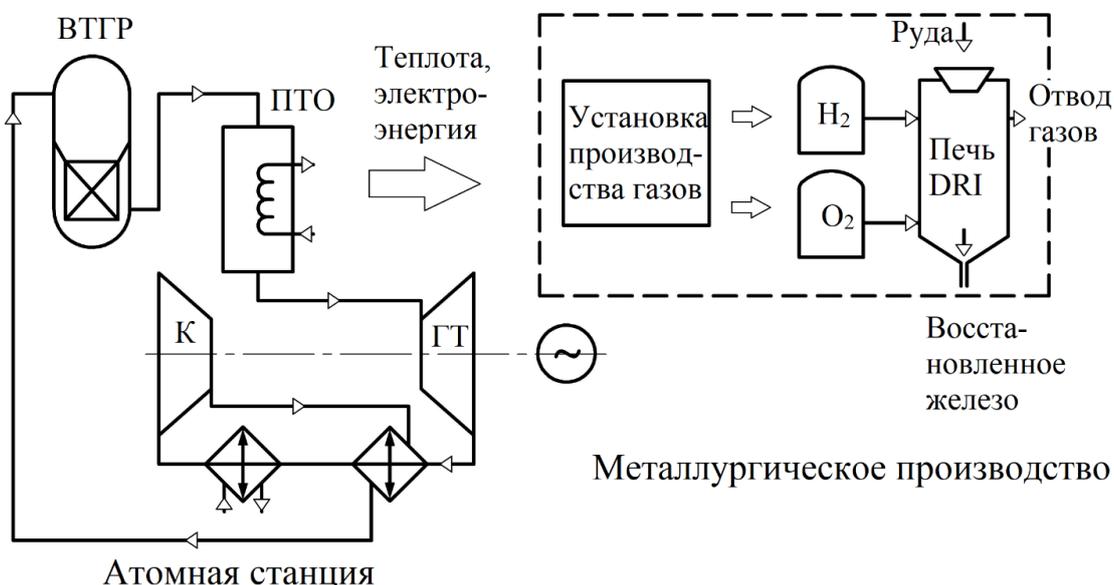


Рисунок 1.6 – Схема применения ВТГР в черной металлургии

Железо, полученное в виде окатышей по данной технологии, содержит 90–94% Fe. Реакция восстановления железа проходит по схеме [69]





Использование синтез-газа или водорода в технологии прямого восстановления металлов (в первую очередь железа) из руд позволяет полностью исключить доменный процесс и снизить негативное влияние металлургического производства на окружающую среду [71].

Применение ВТГР в промышленности требует решения ряда вопросов, на первом месте среди которых вопрос безопасности. По оценкам [4, 10], внутренняя самозащищенность ВТГР делает их привлекательными для промышленности с экономической и экологической точки зрения. Вторая проблема – остановки реактора на перегрузку с неизбежным простоем производства – может быть решена применением ВТГР с шаровыми твэлами, в которых перегрузка ядерного топлива происходит «на ходу» [10]. Также встает вопрос разработки аппаратов конверсии с нагревом парометановой смеси в слое дисперсного катализатора потоком гелия вместо продуктов сгорания метана, как это имеет место в современных печах риформинга.

1.3 Теплообмен и течение газа в шаровом слое (засыпке) активной зоны ВТГР

Для проектирования активной зоны ВТГР требуются подробные данные по газодинамике и теплообмену при течении газа сквозь шаровую засыпку. Засыпка ВТГР представляет собой плотный дисперсный слой, частицы которого постоянно соприкасаются между собой [22]. В качестве основной геометрической характеристики шарового слоя большинство авторов [20–22, 72, 73] используют пористость (в некоторых источниках порозность) ε – долю не занятого шаровыми элементами объема слоя. В засыпке из сферических элементов одинакового диаметра среднее по сечению значение пористости определяется отношением диаметра аппарата D к диаметру шарового элемента слоя $d_{ш}$ и при $D/d_{ш} > 10$ равно 0,39–0,40 [20, 22]. Для засыпки из сплошных частиц с гладкой поверхностью пористость экспериментально определяют по плотности элементов слоя и насыпной плотности слоя [20].

В существующих проектах ВТГР шаровая засыпка состоит из твэлов одинакового диаметра. В таком монодисперсном слое возможен лишь точечный контакт

элементов, и в области контакта между шарами образуется круговая капиллярная щель, вблизи которой возникают «застойные зоны» [10, 22, 74]. В случайных засыпках шаров возможна упорядоченная упаковка. Основные варианты регулярных структур представлены на рисунке 1.7, а их характеристики даны в таблице 1.3 [20, 22, 72]. В данной работе приняты следующие наименования регулярных упаковок: 1 – кубическая; 2 – ромбоэдрическая; 3 – октаэдрическая; 4 – винтовая; 6 – тетраэдрическая [20, 75, стр. 166].

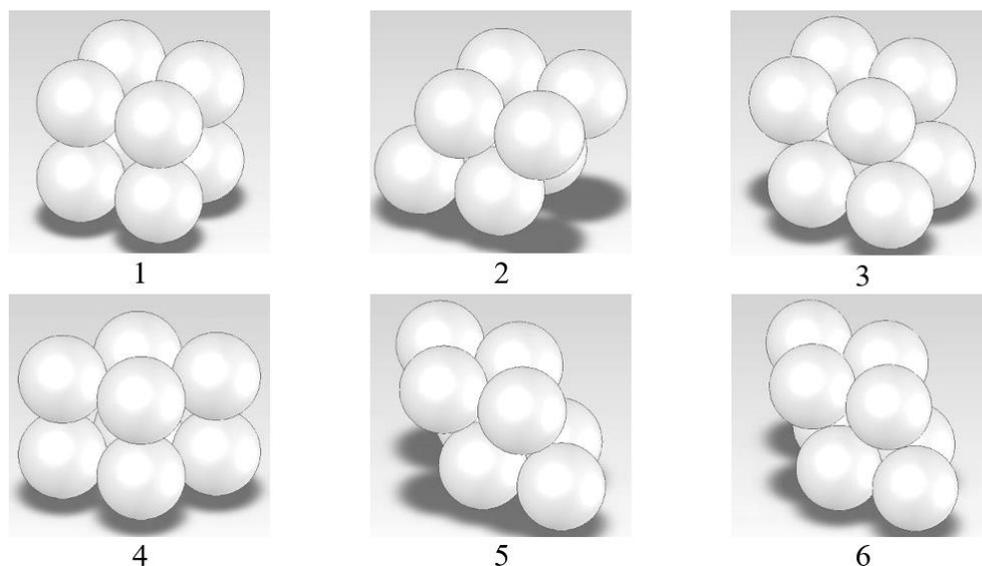


Рисунок 1.7 – Регулярные расположения шаров в пространстве
(элементарные ячейки)

Таблица 1.3 - Характеристики регулярных упаковок

№ на рисунке 1.7	Расстояние между слоями	Число контактов одного шара с соседними	ϵ , отн. ед.	«Живое» сечение	
				ψ_{max}	ψ_{min}
1	$d_{ш}$	6	0,476	1,0	0,214
2	$0,866 d_{ш}$	8	0,3954	0,635	0,214
3	$0,707 d_{ш}$	12	0,2595	0,349	0,214
4	$d_{ш}$	8	0,3954	1,0	0,093
5	$0,866 d_{ш}$	10	0,3019	0,58	0,093
6	$0,816 d_{ш}$	12	0,2595	0,455	0,093

«Живое» сечение – это величина просвета в каждом сечении элементарной ячейки, которая последовательно меняется от ψ_{min} до ψ_{max} . При нерегулярной

укладке шаров слой в целом изотропен, поэтому «живое» сечение в среднем равно ε в любом сечении аппарата [20, 22, 72].

Удельная поверхность насыпного слоя a , $\text{м}^2/\text{м}^3$, т. е. поверхность элементов слоя, приходящаяся на единицу его объема, зависит как от пористости ε , так и от размера и формы элементов слоя. Для слоя шаровых элементов

$$a = 6 \cdot (1 - \varepsilon) / d_{\text{ш}}. \quad (1.5)$$

Пористость, «живое» сечение и удельная поверхность, вместе с диаметром сферического элемента, являются определяющими геометрическими характеристиками шаровой засыпки.

1.3.1 Течение газового потока в шаровой засыпке

Движение жидкости или газа через шаровую засыпку в каждой точке между элементами внутри слоя подчиняется основным законам механики сплошных сред описывается уравнением Навье – Стокса и уравнением неразрывности [72]. К этим уравнениям добавляют граничные условия отсутствия скольжения на поверхностях всех элементов слоя. Но ввиду сложной структуры шаровой засыпки точное решение задачи описания процессов газодинамики и теплообмена в ней практически неосуществимо, поэтому расчетные зависимости обычно получают на основе обобщения экспериментальных данных в форме критериальных зависимостей [21, 22, 72].

В литературе [20 и др.] предложены две базовые модели течения теплоносителя в слое шаровых элементов – внутренняя (капиллярная модель) и внешняя (модель в виде ансамбля шаров).

В рамках внешней модели рассматривается обтекание газом или жидкостью отдельных шаровых элементов, текучая среда считается единым целым. В критерии подобия – число Рейнольдса и число Нуссельта – входит диаметр шарового элемента $d_{\text{ш}}$, скорость U – скорость фильтрации – определяется как отношение объемного расхода текучей среды к полному сечению аппарата без учета загромождения шаровыми элементами:

$$Re_{\text{ш}} = U d_{\text{ш}} / \nu, \quad (1.6)$$

$$Nu_{ш} = \alpha \cdot d_{ш} / \lambda, \quad (1.7)$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости текучей среды, $\text{м}^2/\text{с}$, α – коэффициент теплоотдачи от шарового элемента к теплоносителю, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, λ – теплопроводность газа, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Внутренняя модель рассматривает течение как движение отдельных струек в системе изогнутых каналов с внезапными сужениями и расширениями. При этом геометрический параметр – эквивалентный диаметр канала

$$d_3 = 4\varepsilon / a, \quad (1.8)$$

для слоя шаров одинакового диаметра равный $d_3 = 4\varepsilon d_{ш} / [6 \cdot (1 - \varepsilon)]$, а скорость $U_3 = U / \varepsilon$, называемая скоростью скольжения, равна средней скорости потока в пространстве между элементами слоя. Тогда число Рейнольдса

$$Re_3 = U_3 d_3 / \nu. \quad (1.9)$$

Для слоя шаров одинакового диаметра числа Рейнольдса внутренней и внешней моделей связаны соотношением

$$Re_3 / Re = 4 / [6 \cdot (1 - \varepsilon)]. \quad (1.10)$$

Внутренняя (капиллярная) модель обладает рядом недостатков, например, не учитывает постоянное соединение и разъединение потоков между элементами слоя. В условиях течения при одновременном воздействии сил инерции и сил вязкости эта модель не может объяснить развития турбулентной вязкости, теплопроводности и диффузии в слое шаровых элементов. Учитывая эти недостатки, в данном исследовании течение газа в шаровой засыпке рассматривается в рамках внешней задачи.

Характерная особенность течения газа через зернистый слой – раннее наступление турбулентного режима, которое вызвано интенсивным вихреобразованием. В шаровых засыпках ламинарный пограничный слой нарушается уже при числах $Re = 10 \dots 15$, а турбулентный пограничный слой без образования вихрей существует лишь до $Re = 200$ [21]. Гидродинамику шаровой засыпки определяют отрывное расширение потока в пространстве между зернами слоя, сужение потока, криволинейность течения между элементами слоя, разделение и слияние потоков при обтекании шаров [21, 73].

В случае установившегося ламинарного движения газа в слое с предельно низкими скоростями (ползущего движения) перепад давления определяется формулой Дарси [20, 76, стр. 604]:

$$\Delta p = \mu H U / k, \quad (1.11)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; H – толщина слоя в направлении течения, м; k – коэффициент проницаемости слоя по Дарси, м². Для слоя сферических элементов

$$k = 6,7 \cdot 10^{-3} d_{ш}^2 \varepsilon^3 / (1 - \varepsilon)^3. \quad (1.12)$$

Формула (1.12) применима в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_{ш} = 3 \dots 10$, т. е. при низких скоростях фильтрации [76]. Такие скорости практически не встречаются в активных зонах ядерных реакторов.

При турбулентном течении гидравлическое сопротивление слоя исследователи обычно представляют в виде зависимости от геометрических размеров слоя (длины в направлении потока), размеров элемента слоя, скорости, плотности жидкости, а также коэффициента сопротивления, зависящего от числа Рейнольдса. Можно использовать формулу Дарси – Вейсбаха

$$\Delta p = \zeta \frac{H}{d_3} \frac{\rho U_3^2}{2}, \quad (1.13)$$

где ζ – эмпирический коэффициент гидравлического сопротивления слоя, отражающий как потери на трение, так и местные сопротивления при движении по искривленным каналам.

Подставляя в (1.13) выражения для d_3 и U_3 , получим

$$\Delta p = \zeta \frac{H \cdot 6(1 - \varepsilon)}{4 \varepsilon d_{ш}} \frac{\rho U^2}{2 \varepsilon^2}. \quad (1.14)$$

При расчетах популярностью пользуется уравнение Эргуна [77]

$$\Delta p = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^2} \frac{H}{d_{ш}^2} \mu U + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{H}{d_{ш}} \rho U^2 \quad (1.15)$$

где H – высота слоя, м. Уравнение (1.15) получено из (1.14) путем подстановки эмпирической зависимости для коэффициента гидравлического сопротивления слоя ζ :

$$\zeta = 1,75 + 150 \frac{(1 - \varepsilon)}{Re}. \quad (1.16)$$

Первое слагаемое (1.15) учитывает сопротивление трения, а второе – сопротивление формы. Уравнение (1.15) было предложено в 1952 г. Сабри Эргуном, однако более поздние исследования [78] показали, что константы, входящие в уравнение, зависят от числа Рейнольдса. Согласно обзору, выполненному в [78], в ряде случаев экспериментальные значения сопротивления отличались от расчетных по формуле Эргуна в 1,5–2 раза.

При турбулентном движении можно воспользоваться формулой, предложенной в [72]:

$$\Delta p = \frac{3(1 - \varepsilon)}{2\varepsilon\psi_{\min}} \left(1 + 422 Re_{\max}^{-1}\right) \frac{HU^2}{d_{\text{ш}}}, \quad Re_{\max} = \frac{Ud_{\text{ш}}}{\psi_{\min} \nu}. \quad (1.17)$$

Здесь Re_{\max} – число Рейнольдса, рассчитанное по максимальной скорости потока и диаметру отдельной сферы; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; ψ_{\min} – минимальная величина просвета, доли единицы.

Согласно ранним исследованиям [19], гидравлическое сопротивление засыпанных произвольно шаров с пористостью слоя $\varepsilon \approx 0,4$ описывается приближенной формулой:

$$\xi = 20 + 7 \cdot 10^3 Re^{-1} \quad (1.18)$$

в диапазоне чисел $Re = Ud_{\text{ш}}/\nu = 1 \dots 5 \cdot 10^3$.

Ряд аналогичных соотношений приводится в обзорах [23, 79, стр. 153-154] и др., где рассматриваются коэффициенты гидравлического сопротивления в зависимости от диапазона Re и характеристик слоя (диаметра, формы элементов), например [73],

$$\Delta p = \frac{3\xi(1 - \varepsilon)\rho U^2 H}{\varepsilon^3 d_{\text{с}}}; \quad Re_{\text{с}} = \frac{Ud_{\text{с}}}{\varepsilon \nu}; \quad (1.19)$$

$$\xi = 36,4 \cdot Re_{\text{с}}^{-1} + 0,45 \text{ для } Re_{\text{с}} < 2 \cdot 10^3;$$

$$\xi = 1,09 \cdot Re_{\text{с}}^{-0,14} \text{ для } 2 \cdot 10^3 < Re_{\text{с}} < 10^5.$$

Таким образом, в литературе представлены эмпирические зависимости для течения в шаровой засыпке в широком диапазоне чисел Рейнольдса, однако характерная скорость во всех зависимостях принимается постоянной, то есть не учитываются возможные изменения средней скорости газа.

1.3.2 Теплообмен газового потока в шаровой засыпке

Изучению конвективного теплообмена между частицами в свободных засыпках и продуваемым через засыпку газом посвящено значительное количество экспериментальных исследований, часть которых выполнена применительно к аппаратам высокотемпературным газоохлаждаемым реакторам. Для расчета Nu разработаны обобщенные методики, в которых используется единственная геометрическая характеристика – пористость в рамках внешней и проходное сечение газа в рамках внутренней модели течения. Например, в работе [22] на основе литературных данных и собственных экспериментов автора получены зависимости в диапазоне чисел Рейнольдса, характерном для реакторов ВТГР:

$$Nu = 0,30 \frac{(1 - \varepsilon)^{0,35}}{\varepsilon^{1,225}} Re^{0,65}, Re = 2 \cdot 10^3 \dots 10^4; \quad (1.20)$$

$$Nu = 0,18 \frac{(1 - \varepsilon)^{0,3}}{\varepsilon^{1,25}} Re^{0,7}, Re = 10^4 \dots 2,5 \cdot 10^5. \quad (1.21)$$

Автор [22] исследовал средний коэффициент теплоотдачи при охлаждении воздухом шаровых электрокалориметров диаметром 51 мм в диапазоне изменения $Re = 3,5 \cdot 10^3 \dots 4 \cdot 10^5$, объемной пористости 0,265...0,4.

В таблице 1.4 приведены примеры эмпирических зависимостей, полученных разными авторами для засыпок гладких шаров.

В непосредственной близости от стенки аппарата, ограничивающего зернистый слой, пористость наиболее сильно отклоняется от среднего значения [20, 22]. Так как отличие коэффициента теплоотдачи в пристеночной области определяется отличием скорости и пористости, то, приняв одинаковыми плотность, диаметр шара и состав газа, можно получить зависимость [22]:

$$\frac{\alpha_{cm}}{\alpha} = \left(\frac{1 - \varepsilon_{cm}}{1 - \varepsilon} \right)^{0,3} \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{\varepsilon_{cm}} \right)^{0,25} \left(\frac{U_{cm}}{U} \right)^{0,7}, \quad (1.22)$$

где $U_{cm} \approx \bar{U} (\varepsilon_{cm} / \bar{\varepsilon})^2$.

Таблица 1.4 – Эмпирические зависимости для расчета средней теплоотдачи в шаровом слое

Зависимость	Re	ε	Примечания
$Nu = 0,25 Re^{0,82}$	10...2·10 ²	0,40	Нестационарный режим: прогрев стальных шариков и измерение скорости изменения температуры газа на выходе из слоя [80]
$Nu = 0,106 Re$	20...200	–	В. Н. Тимофеев, 1949. Обобщение опытных данных. Не определено влияние пористости [22]
$Nu = 0,61 Re^{0,67}$	200...2000	–	
$Nu = 0,411 \frac{(1 - \varepsilon)^{0,36}}{\varepsilon} Re^{0,64}$	30...1900	0,365...0,463	Насадки из стальных шаров и стальных колец [20]

В ядерных энергетических реакторах с шаровыми твэлами для обеспечения безопасности, в частности исключения растрескивания оболочки и выхода радиоактивных веществ в теплоноситель, требуется производить точный расчет температурного поля в оболочке и топливном сердечнике твэла. Для этого необходимо знать закон распределения локального коэффициента теплоотдачи $\alpha_{лок}$ по поверхности шаровых элементов. Экспериментально изучалось [23] распределение $\alpha_{лок}$ по поверхности одиночной сферы; по поверхности сферы в регулярных упаковках (с переменной пористостью $\varepsilon = 0,259...0,476$); в свободных засыпках. Согласно [23], на распределение локальной теплоотдачи оказывают существенное влияние турбулентность набегающего потока и температурный напор, что проявляется, например, в смещении точки отрыва пограничного слоя. Вне зависимости от варианта упаковки шаров в засыпке коэффициент неравномерности распределения $\alpha_{лок}$ по поверхности сферы убывает при увеличении числа Re. Это в первую очередь связано с турбулизацией потока в укладке.

1.3.3 Радиальное течение газа в установках с шаровым слоем

Шаровые засыпки имеют высокое гидродинамическое сопротивление, поэтому на прокачку газа через такую засыпку тратится значительное количество энергии. На АЭС с реактором типа ВТГР с шаровой активной зоной на собственные нужды используется до 20% мощности [10]. Поэтому имеет смысл проанализировать альтернативные схемы течения, например возможность радиальной раздачи теплоносителя.

Помимо уже упомянутых факторов, определяющих гидродинамику и теплообмен в шаровой засыпке, на характеристики течения влияет изменение средней скорости в засыпке $U \sim 1/r$, где r – значение координаты по радиусу.

Большая часть исследований, связанных с радиальным течением через зернистый слой, проводилась в области добычи нефти и газа. Для таких течений характерны малые скорости движения среды в грунте, а линейный размер пор обязывает учитывать капиллярные силы. Очевидно, что законы течения через слой грунта неприменимы для промышленных аппаратов с большими скоростями течения и крупными частицами.

В работах [27–29] рассматривается радиальное течение газа в канале газоохлаждаемого реактора (рисунок 1.8) при значениях $Re = 20 \dots 2000$ (число Re определялось по скорости фильтрации и диаметру сферы). Тепловыделяющая сборка (ТВС) представляет собой два коаксиальных перфорированных цилиндра с шаровой засыпкой между ними.

По результатам экспериментов [27-29] сделаны следующие выводы относительно режимов течения:

1. При $Re < 20$ в пористой среде движутся ламинарные струи, разделенные застойными зонами с почти покоящимся или медленно циркулирующим теплоносителем.

2. При $20 < Re \leq 100$ в застойных зонах развиваются застойные вихревые течения. В механизм обмена импульсов в этих зонах включается перенос импульса в результате циркуляции в ячейках и турбулентности.

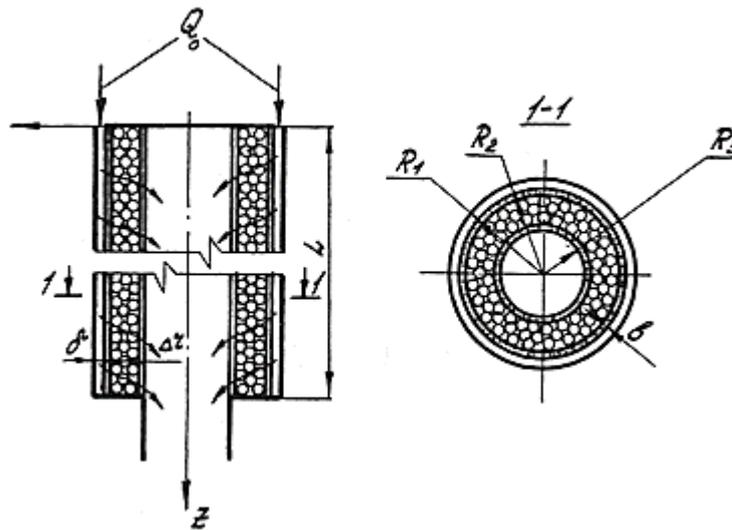


Рисунок 1.8 - Схема ТВС с радиальной раздачей теплоносителя

3. При $100 < Re < 2000$ по центральной части ТВС распространяется турбулентная струя, которая через вихревую область отрывного течения за сферами обменивается импульсом с пристенной струей сферы; вихревая структура за сферой дробится. При $Re \approx 500$ отдельные вихри сливаются в турбулентное пятно, которое интенсивно пульсирует в поперечном направлении. В пристенных ячейках различима четкая граница между ламинарным слоем у стенки ТВС и турбулентной пульсирующей зоной, поступающей из вихревой области.

Для определения гидродинамического сопротивления засыпки В.И. Лелеков [28] предложил расчетную формулу:

$$\Delta p = \frac{3}{2} \xi \frac{(1-\varepsilon)}{\psi} \frac{B}{d_{\text{ш}}} \rho u^2; \quad \psi = 1 - 1,17(1-\varepsilon)^{2/3}, \quad (1.23)$$

где ξ – коэффициент сопротивления; B – радиальная ширина слоя элементов; ρ – плотность, u – скорость обтекания сферического элемента. Коэффициент сопротивления и скорость обтекания определяются экспериментально.

Также в работе [28] получена зависимость неравномерности температур на поверхности сферы от числа Re :

$$\frac{t_{\text{max}} - t_{\text{min}}}{qr_n} \lambda_{\text{ш}} = [2,85 + 26,6(1-\varepsilon)] Re^{-0,6}, \quad (1.24)$$

где q – удельное энерговыделение в сферическом элементе, Вт/м²; r_n – радиус наружного коллектора, м; $\lambda_{\text{ш}}$ – теплопроводность материала сферы, Вт/(м·К).

Согласно [28, 29], скорость обтекания является функцией пористости и не зависит от геометрии аппарата с шаровой засыпкой. В формуле (1.23) не учитывается значительное ускорение потока в направлении течения, которое возникает в слое шаровых элементов при большой относительной кривизне раздаточного и сборного коллекторов. При той геометрии канала, которая исследовалась в [27, 28], радиальная компонента осредненной скорости практически близка к нулю по всему сечению раздаточного коллектора, за исключением очень узкой зоны, находящейся в непосредственной близости к проницаемой стенке.

Однако ускорение потока в направлении течения оказывает существенное влияние на гидродинамику и теплообмен в шаровой засыпке, что требует учитывать его при расчете аппаратов с радиальным течением газа в шаровом слое. В этой связи необходимы исследования, результаты которых позволят получить расчетные формулы для коэффициентов гидродинамического сопротивления и теплоотдачи, учитывающие особенности течения потока.

1.4 Явление реламинаризации газового потока в каналах с конфузурной конфигурацией

Радиальное течение газа в слое шаровых элементов можно рассматривать как течение с ускорением потока в направлении от раздаточного коллектора большего радиуса к приемному коллектору меньшего радиуса, либо как течение с ускорением потока при течении газа в обратном направлении. Ускорение потока, как показали исследования на моделях в осесимметричных каналах [81-83], сопровождается эффектом реламинаризации (ламинаризации) турбулентного течения в пограничном слое, при котором наблюдается переход турбулентного течения в ламинарное. Реламинаризация потока приводит не только к значительному уменьшению гидравлического сопротивления, но и заметному снижению интенсивности теплообмена газа со стенками канала.

Эффект реламинаризации турбулентных течений в каналах исследован на основе интегральных характеристик (профилей скорости и температуры, коэффициентов трения, тепловых потоков) и тонкой структуры поля течений (пульсации скорости, кинетическая энергия турбулентности).

Механизм реламинаризации течения находит следующее объяснение на примере сопла с конфузорной конфигурацией [84]. При возрастании средней скорости газа U в направлении течения, напряжение трения τ вблизи стенки (где несущественны инерционные эффекты) определяется выражением:

$$\tau - \tau_w \approx \frac{dp}{dx} y \approx -\rho U \frac{dU}{dx} y, \quad (1.25)$$

где p – давление, Па; ρ – плотность, кг/м³; x – координата в направлении течения, м; y – координата, направленная по нормали к обтекаемой поверхности, м; τ_w – напряжение трения на стенке. Это выражение можно преобразовать к виду:

$$\frac{\tau}{\tau_w} = 1 - \left(\frac{c_f}{2} \right)^{-3/2} \cdot K \cdot y \cdot \left(\frac{\tau_w}{\rho v} \right)^{1/2}, \quad (1.26)$$

где $c_f = 2\tau_w / (\rho U^2)$ – коэффициент трения;

$$K = \frac{v}{U^2} \cdot \frac{dU}{dx} = \frac{2\beta}{Re}$$

– параметр ускорения потока, β – тангенс угла наклона стенки конфузора к оси потока.

Расчетные и экспериментальные значения числа Nu и коэффициента трения потока в канале с переменной степенью конфузорности (степенью сужения канала) приведены на рисунках 1.9 и 1.10 [85]. Видно, что при параметре $K = 3,69 \cdot 10^{-6}$ число Nu уменьшается по всей длине конфузора; аналогично снижается коэффициент трения c_f .

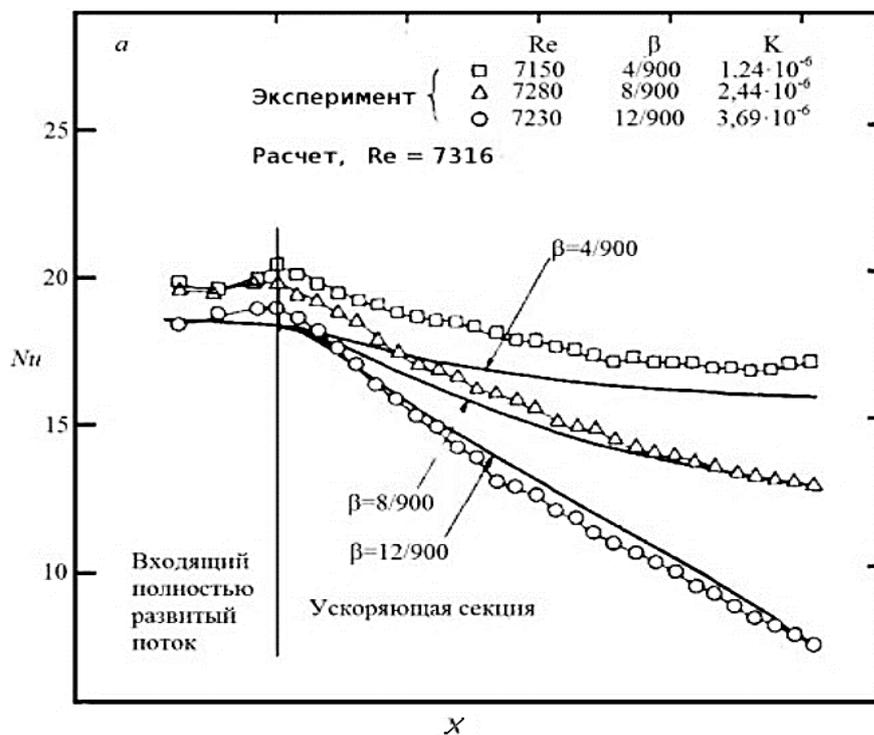


Рисунок 1.9 – Изменение числа Нуссельта по длине канала при ускоренном течении потока

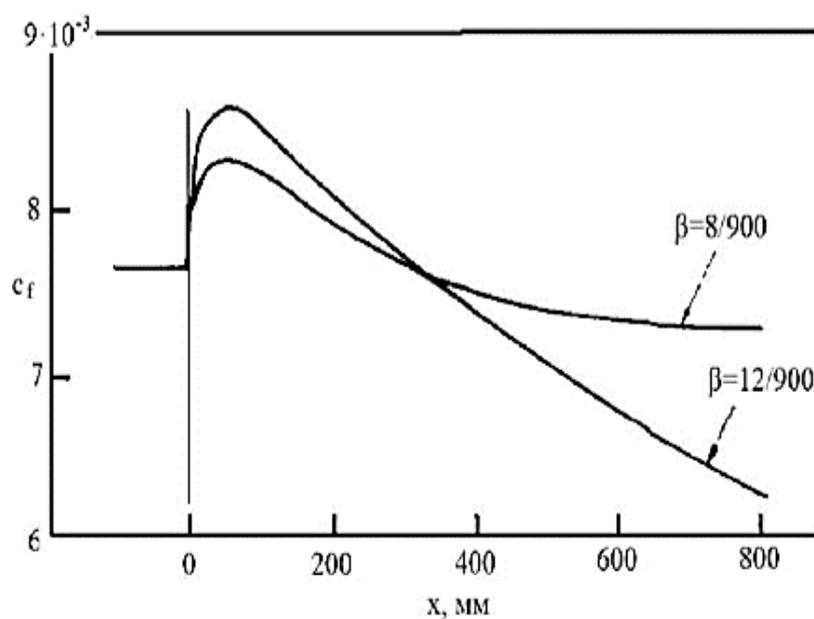


Рисунок 1.10 – Изменение коэффициента трения по длине канала при ускоренном течении потока

Если параметр ускорения потока K превышает некое пороговое значение, то напряжение трения принимает малые значения в той части пристеночного слоя, где

максимально производство турбулентности. Отрицательная генерация турбулентной энергии вызывает реламинаризацию потока [81].

Ускорение потока вызывает снижение пульсационных составляющих скорости и энергии турбулентности, увеличение толщины вязкого подслоя, оказывает влияние на интенсивность теплообмена и турбулентное число Прандтля.

Критическое значение параметра ускорения K слабо зависит от числа Рейнольдса и составляет $K_{кр} = (3,5 \dots 3,6) \cdot 10^{-6}$ [81]. При достижении этих значений турбулентный пограничный слой практически полностью переходит в ламинарное состояние. Снижение характеристик теплообмена начинает отмечаться при $K \sim (2 \dots 4) \cdot 10^{-6}$ [86].

Если турбулентный режим течения потока в осесимметричных каналах наблюдается при $Re > 2 \cdot 10^3$, то в условиях течения газа внутри шарового слоя вихреобразование и общая турбулизация потока происходит при сравнительно малых числах $Re \geq 100$ и связана с образованием устойчивых крупных дискретных вихрей, питающих турбулентную межшаровую область газового потока [28].

При течении газа в шаровом слое в аппаратах с постоянным поперечным сечением, т.е. при отсутствии ускорения потока, или в аппаратах с радиальной схемой течения при значениях ускорения потока $K < 10^{-6}$ (малая толщина радиального слоя шаров) гидродинамические и теплообменные характеристики потока практически не меняются в направлении течения.

В условиях значительного ускорения газового потока при $K > 10^{-6}$ эффект реламинаризации может оказывать значительное влияние как на характер вихреобразования потока в межшаровой области слоя, так и на его общий уровень турбулентности.

Анализ исследований в этой области показал, что проблема реламинаризации течения газа в слоях шаровых элементов в литературе не рассматривалась.

1.5 Выводы и основные задачи исследований

Обзор литературы, выполненный в соответствии с основной целью работы, позволил сделать следующие выводы.

1. Анализ опубликованных в научно-технической литературе результатов исследований течения газа в слое с шаровой засыпкой показал, что основная часть исследований относится к схеме с осевым течением газа в слое, либо ограничена рамками малых соотношений наружного и внутреннего диаметров раздаточных коллекторов при радиальном течении газа, что на практике соответствует осевой схеме течения.

2. Большинство авторов отмечает, что границы вихреобразования и турбулизации потока в межшаровой области соответствуют числа $Re \geq 100$. Однако в литературе отсутствуют данные по влиянию неизотермичности и ускорения потока в слое на вихреобразование и его интенсивность в широком диапазоне чисел Re .

3. Отсутствуют данные по изменению гидравлического сопротивления и теплообмену газа с шаровыми элементами в направлении течения потока в слое при радиальной раздаче теплоносителя.

4. Отсутствует методика расчетов ядерных энергетических установок с радиальной схемой течения теплоносителя, учитывающей особенности взаимодействия потока с шаровыми элементами.

С учетом изложенного **целью** диссертационной работы является повышение энергетической эффективности и совершенствование конструкции ВТГР и элементов энерготехнологического оборудования комплекса на базе ВТГР с радиальным течением теплоносителей.

Для достижения этой цели ставились следующие **задачи исследования**:

1. Проведение экспериментальных исследований по гидродинамике 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.

3. Получение на основе анализа экспериментальных данных соотношений, отражающих влияние конструктивных и режимных параметров на гидравлическое сопротивление и теплообмен в слое при радиальном течении газового потока.

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

2 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ГАЗА В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ

2.1 Вычислительная гидродинамика. Моделирование турбулентных течений

Развитие компьютерных методов моделирования [87–90] позволяет детально изучить гидро- и аэродинамические характеристики потока в засыпке шаровых элементов. Подобные задачи аэродинамики и теплообмена решаются с помощью методов вычислительной математики и компьютерного моделирования в программных пакетах вычислительной гидродинамики (CFD – Computational Fluid Dynamics). В настоящее время разработаны многочисленные коммерческие пакеты программ CFD, как универсальные, способные решать широкий круг задач, так и узкоспециализированные.

Исследование с помощью методов вычислительной гидродинамики заключается в построении численной модели изучаемого процесса, которая имитирует течение жидкости или газа при различных исходных данных. В основе CFD лежит математическая модель механики сплошной среды, например уравнения Навье – Стокса и уравнения Рейнольдса для описания течения вязкой жидкости [87]. При помощи методов вычислительной математики на основе уравнений модели ставится математическая задача и строится расчетная сетка для заданных граничных условий. Компьютерное моделирование обеспечивает решение математической задачи и визуализацию результатов моделирования – представление их в виде картин течения, графиков и т. п.

В основу моделирования неизотермического течения газа в каналах сложной формы обычно положены следующие уравнения [91–95]:

– уравнение неразрывности (закон сохранения массы)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho u_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho u_z)}{\partial z} = 0; \quad (2.1)$$

– уравнение движения сплошной среды

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u}; \quad (2.2)$$

– уравнение энергии

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial T}{\partial x} u_x + \frac{\partial T}{\partial y} u_y + \frac{\partial T}{\partial z} u_z = a \nabla^2 T + \frac{q_v}{\rho c_p}, \quad (2.3)$$

где ρ – плотность текучей среды, u – скорость текучей среды, p – давление, t – время, x, y, z – координаты; g – ускорение свободного падения, μ – коэффициент динамической вязкости, T – температура, a – коэффициент температуропроводности, q_v – объемное энергосодержание, c_p – изобарная теплоемкость.

В рамках вычислительной гидродинамики уравнения (2.1) и (2.2) называют уравнениями Навье – Стокса и записывают в виде системы:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2.5)$$

где уравнение движения (2.5) представляет собой уравнения переноса для трех проекций скорости, τ_{ij} – компоненты тензора сдвиговых напряжений. При наличии объемных сил (гравитационных, вращения и т. п.) в уравнении (2.5) появляются дополнительные слагаемые.

Большинство течений жидкости или газа являются турбулентными. При турбулентном течении частицы среды совершают неупорядоченные движения по сложным траекториям, что приводит к интенсивному перемешиванию жидкости или газа. Таким образом, при турбулентном течении характеристики потока (скорость, давление, температура и т. д.) испытывают случайные колебания вокруг средних значений – турбулентные пульсации. Все характеристики течения представляют в виде суммы средней и пульсационной компонент [96]:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i; \quad c = \bar{c} + c', \quad (2.6)$$

где u_i – компоненты скорости; c – скалярные величины.

Средние значения определяются осреднением на достаточно большом интервале времени от 0 до t_k :

$$\bar{u}_i = \lim_{t_k \rightarrow \infty} \frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} u_i(t) dt; \quad \bar{c} = \lim_{t_k \rightarrow \infty} \frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} c(t) dt. \quad (2.7)$$

Пульсации имеют широкий спектр временных и пространственных масштабов, поэтому на практике для описания турбулентного течения используют статистические подходы, т. е. вычисляют и измеряют осредненные характеристики потока.

Для описания турбулентных течений применяют следующие характеристики:

– кинетическая энергия турбулентности, которая характеризует интенсивность пульсаций скорости:

$$k = 0,5 \overline{u'_j u'_j}; \quad (2.8)$$

– средняя пульсационная скорость пространственных изотропных колебаний:

$$u' = \sqrt{\frac{2k}{3}}; \quad (2.9)$$

– интенсивность турбулентности – отношение средней пульсационной скорости к характерной скорости набегающего потока:

$$I_t = \frac{u'}{U}; \quad (2.10)$$

– пространственный масштаб турбулентности l_t – характеристика крупных вихрей, параметры которых зависят от условий образования, формы и размера области течения;

– турбулентное число Рейнольдса:

$$Re_t = u' l_t / \nu; \quad (2.11)$$

– скорость диссипации ε – убыль кинетической энергии турбулентности в единицу времени.

Для исследования турбулентных течений применяют один из трех подходов, которые различаются степенью детальности разрешения турбулентных пульсаций и их энергетического спектра. Прямое численное моделирование (DNS) заключается в решении трехмерных нестационарных уравнений Навье – Стокса с использованием мелких пространственно-временных сеток, достаточных для разрешения

всех неоднородностей течения. Это наиболее точный, но и наиболее затратный метод. Метод моделирования крупных вихрей (LES) предполагает отфильтровывание турбулентных структур, которые меньше размеров используемой расчетной сетки. При этом крупные турбулентные вихри моделируются практически без искажений, а влияние отфильтрованных мелких вихрей учитывается при помощи полуэмпирических моделей [96].

Большинство универсальных пакетов вычислительной гидродинамики применяет модели на основе усреднения по Рейнольдсу (RANS). В рамках этого подхода исходные уравнения осредняются по всему спектру пульсаций, а появившиеся в результате неизвестные определяют при помощи полуэмпирических моделей турбулентности. Численное решение представляет собой поле средних значений [96]. Для течений с переменной плотностью по алгоритму, предложенному Фавром, дополнительно применяется осреднение к уравнению неразрывности.

В рамках подхода RANS получается система уравнений Навье – Стокса, осреднённых по Рейнольдсу [97, 98]:

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0; \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} + \tau_{ij}) + g_i, i=1,2,3. \quad (2.12)$$

В уравнении (2.12) $\sigma_{ij} = \mu \cdot e_{ij}$ – тензор вязких напряжений осредненного течения, выраженный через скорости деформаций

$$e_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i},$$

а τ_{ij} – тензор турбулентных напряжений.

Поскольку уравнения не замкнуты, вводят дополнительные уравнения

$$\tau_{ij} = \mu_T e_{ij}, \quad (2.13)$$

где μ_T – коэффициент турбулентной вязкости, зависящий от особенностей турбулентного течения, а не от свойств жидкости. Турбулентная вязкость задаётся через средние характеристики потока при помощи полуэмпирических моделей турбулентности.

Классическими считаются [98] изотропные двухпараметрические модели $k - \omega$ и $k - \epsilon$, где k – кинетическая энергия пульсации скорости, ω – частота, на которой происходит диссипация вихревой энергии, ϵ – скорость диссипации кинетической энергии пульсации. Через эти параметры вычисляется турбулентная вязкость, а сами они задаются при помощи дифференциальных уравнений [99].

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что компьютерное моделирование турбулентных течений представляет интерес в инженерных задачах, когда целью исследования становятся средние характеристики потока, а также для получения качественных представлений о структуре потока.

2.2 Моделирование обтекания одиночного шара потоком газа в изотермических условиях

Было выполнено моделирование обтекания одиночного шара изотермическим потоком газа в пакете Flow Simulation с целью оценки возможности применения этого пакета для моделирования обтекания шаровых элементов.

Пакет вычислительной гидродинамики Flow Simulation основан на численном решении уравнения неразрывности (2.11), уравнения Навье – Стокса (2.12) и уравнения сохранения энергии (2.3) для потока методом конечных объемов. Для расчета турбулентных течений используется метод RANS. Система уравнений замыкается уравнениями состояния для текучей среды и эмпирическими зависимостями теплофизических свойств от температуры и давления. Газы в общем случае рассматриваются как идеальные.

Для расчета потока вблизи стенки и описания перехода от ламинарного течения к турбулентному и наоборот используется модель ламинарного и турбулентного пограничного слоя, которая основана на так называемом приближении приведенной функции стенки. В рамках этой модели рассчитываются точные граничные условия по скорости и температуре, которые затем применяются в приведенных выше уравнениях сохранения.

Для нахождения численного решения непрерывная нестационарная математическая модель физических процессов дискретизируется по пространству и по

времени [92]. Расчетная область покрывается трехмерной расчетной сеткой, ячейки которой параллельны координатным плоскостям. Значения независимых переменных рассчитываются в центрах ячеек сетки. Процесс построения расчетной сетки начинается с построения базовой сетки, число ячеек которой задается пользователем. Для разрешения расчетной сетки относительно геометрических особенностей расчетной модели используется локальное дробление ячеек базовой сетки, т. е. каждая базовая ячейка в области контакта твердого тела и текучей среды делится на 8 одинаковых дочерних ячеек. Flow Simulation поддерживает 7 уровней дробления. Аналогично разрешаются области с большими градиентами физических параметров текучей среды или температуры твердого тела. Дробление производится как до начала, так и во время расчета.

В таблице 2.1 приведены характеристики условий вычислительного эксперимента.

Таблица 2.1 – Условия обтекания шара неизотермическим потоком газа

Параметр	Значение
Геометрия модели	Шар диаметром 60 мм
Тип задачи	Внешняя
Текучая среда	Гелий, модель идеального газа
Условия на стенке	Адиабатическая, гладкая
Скорость набегающего потока	0,01...100 м/с
Температура набегающего потока	20 °С
Давление набегающего потока	101 325 Па

Результаты расчёта в виде зависимости коэффициента гидродинамического сопротивления от числа Рейнольдса приведены на рисунке 2.1. Число Рейнольдса определялось по формуле

$$Re = u \cdot d / \nu, \quad (2.14)$$

где u – средняя скорость набегающего потока, м/с; d – диаметр шарового элемента, м; ν – кинематическая вязкость набегающего потока, м²/с². Коэффициент гидродинамического сопротивления вычислялся как [76]:

$$\zeta = 8 \cdot F / (\pi d^2 \rho u^2), \quad (2.15)$$

где F – сила, действующая на шар со стороны набегающего потока, Н; ρ – плотность газа, кг/м³.

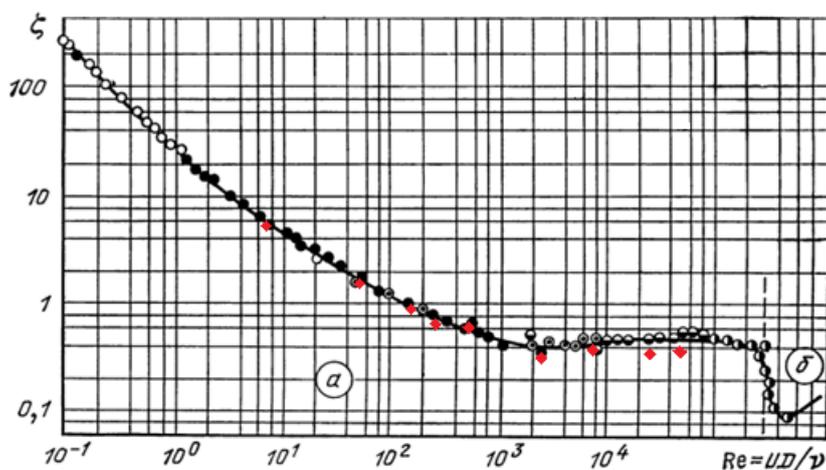


Рисунок 2.1 – Зависимость ζ от числа Re

Помимо отмеченных красными точками полученных в компьютерном эксперименте значений, на рисунке 2.1 приведены по справочным данным [76] эмпирические значения разных авторов. Результаты моделирования в области $10^3 < Re < 2 \cdot 10^5$ ниже эмпирических значений, что может быть связано с турбулентностью набегающего потока в условиях эксперимента и в компьютерной модели. Однако в целом результаты моделирования хорошо коррелируют с эмпирическими данными.

2.3 Моделирование обтекания шарового элемента в слое

При помощи пакетов Flow Simulation и Comsol.Multiphysics была проведена серия численных экспериментов для исследования обтекания потоком газа шарового элемента, расположенного в засыпке. Согласно рекомендациям [97], использовалась $k - \epsilon$ модель турбулентности. Целью моделирования было исследование зависимости гидродинамического сопротивления слоя шаровых элементов от скорости набегающего потока. Модель представляет собой канал, заполненный шаровыми элементами в ромбоэдрической укладке. Характеристики ее приближены к характеристикам случайной засыпки. Шаровые элементы имели диаметр 60 мм,

длина канала в направлении течения составляла 164 мм, пористость засыпки равна 0,342. В качестве текучей среды использовался воздух. Скорости набегающего потока изменялись от 0,5 до 1,25 м/с [100].

На рисунке 2.2 приведен внешний вид модели и линии тока для скоростей 0,5 м/с и 1,25 м/с.

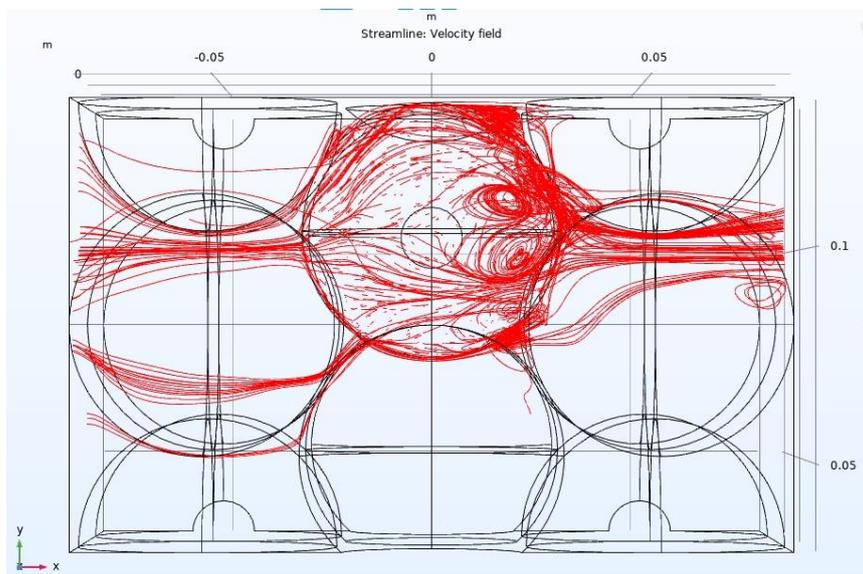


Рисунок 2.2 – Линии тока вокруг шара в засыпке при скорости на входе 0,5 м/с

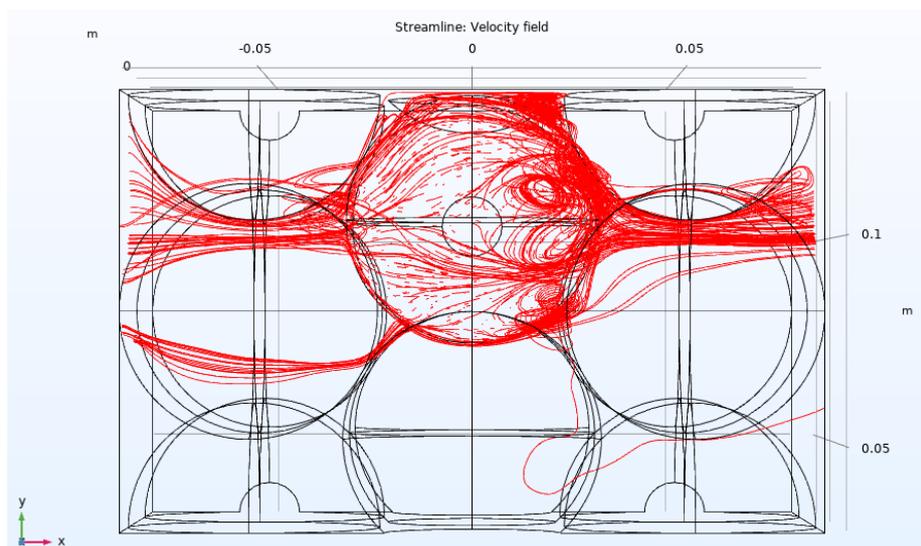


Рисунок 2.3 – Линии тока вокруг шара в засыпке при скорости на входе 1,25 м/с

В данной серии экспериментов вычислялся перепад давлений газа на входе и выходе из модели. Число Рейнольдса вычислялось в рамках внешней модели по формуле (1.6). В таблице 2.2 приведены данные компьютерного моделирования (U ,

Re , Δp) в сравнении с данными эмпирических зависимостей. Re_{max} и Δp_1 определены по формуле (1.17) [72]; $Re_{э}$, ξ и Δp_2 вычислены по (1.19) [73].

Таблица 2.2 – Зависимость значения потерь давления от скорости потока

U, м/с	Re	Δp , Па	Re_{max}	Δp_1 , Па	$Re_{э}$	ξ	Δp_2 , Па
0,5	1991	46,95	14278	17,55	2018	0,379	44,02
0,625	2488	70,95	17847	27,23	2523	0,364	66,67
0,8	3185	112,5	22844	44,38	3229	0,352	105,5
1	3971	171,4	28556	69,09	4037	0,341	159,8
1,25	4977	262,1	35694	107,6	5046	0,33	242,0

График на рисунке 2.4 иллюстрирует различия результатов моделирования и данных, полученных на основании расчетных зависимостей (1.17) и (1.19).

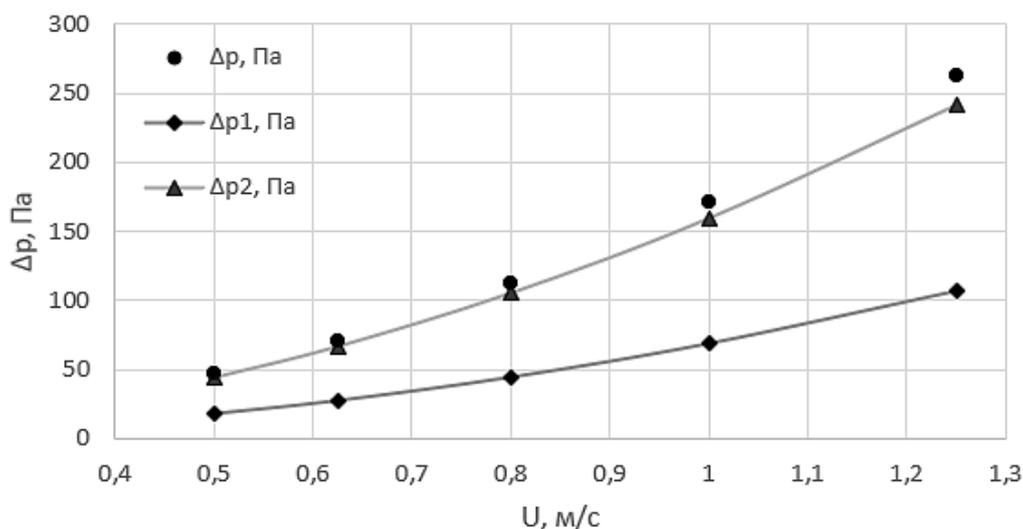


Рисунок 2.4 – Сравнение результатов моделирования и расчетов по эмпирическим зависимостям [72, 73]

Результаты моделирования достаточно точно совпадают с данными расчета по методике, предложенной в [72]. Отсюда можно сделать вывод, что компьютерное моделирование, при условии использования достаточно мелкой сетки, можно использовать для расчета течения газа сквозь шаровую засыпку.

2.4 Моделирование течения газа в элементарной шаровой ячейке

Рассматривается течение газа в элементарной ячейке, состоящей из 8 шаровых элементов диаметром 15 мм, с регулярной ромбоэдрической укладкой. Твердотельная модель (в разрезе) представлена на рисунке 2.5. Расчетная область ограничивается плоскостями, проходящими через центры шаровых элементов, на границах расчетной области заданы условия симметрии.

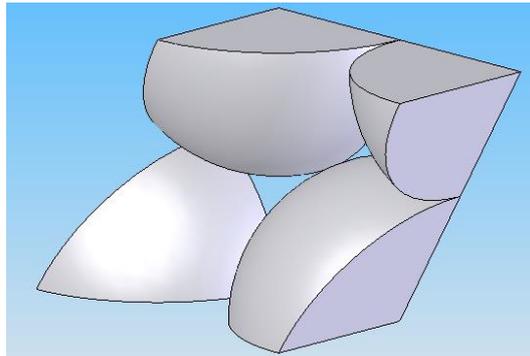


Рисунок 2.5 - Модель элементарной ромбоэдрической ячейки (разрез)

Скорость и характерный размер задавались в рамках внешней модели, число Рейнольдса определялось по формуле (1.6). Расчет проводился в диапазоне чисел Рейнольдса $50 \dots 5 \cdot 10^3$. Температура газа на входе принималась равной 293 К. Турбулизация потока в шаровой засыпке учитывалась заданием повышенной интенсивности турбулентности потока на входе (2% в отличие от обычного показателя аэродинамических труб – 1,5% [17, 101–104]). Влияние теплообмена на структуру потока анализировалось заданием либо объемного тепловыделения от внутренних источников q_V , равномерно распределенных внутри шаровых элементов, либо температуры поверхности шаров в ячейке.

В ходе моделирования ставилось несколько компьютерных экспериментов, которые можно объединить в две серии – исследование гидродинамики при $q_V = 0$ и исследование влияния теплообмена на структуру течения при наличии тепловыделения в шаровых элементах.

В расчете использовалась многоблочная декартова сетка, состоящая из $80 \cdot 10^3$ базовых расчетных ячеек, число ячеек в направлении координатных осей равнялось $N_x = 48$, $N_y = 28$, $N_z = 30$. В ходе моделирования рассматривалась расчетная сетка

различной степени дискретизации (более крупная и более мелкая), и по результатам расчетов данный вариант принят как оптимальный по точности моделирования и затратам компьютерного времени.

Результаты моделирования при $q_v = 0$ приведены в таблице А.1 в Приложении А и на рисунке 2.6 в виде осредненных линий тока в межшаровом пространстве из четырех шаровых элементов.

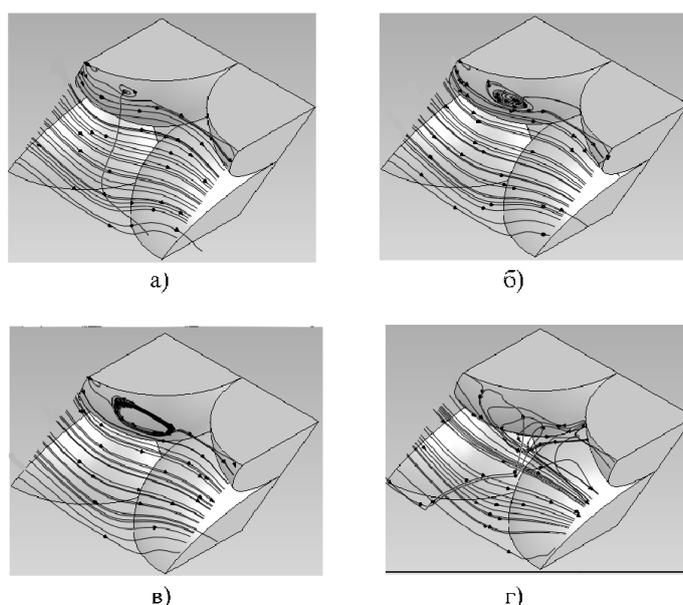


Рисунок 2.6 – Схема течения потока в изотермических условиях (температура газа и шаров 293 К): а) $Re=50$; б) $Re=80$; в) $Re=100$; г) $Re=1000$

При малых числах $Re \leq 50$ течение имеет ламинарный характер без отрыва и вихреобразования. С увеличением скорости потока до значений $Re \approx 80$ вблизи кормовой области шара образуется двухмерный вихрь сравнительно малой интенсивности, практически не оказывающий влияние на основной поток. Начиная с $Re \geq 500$ вихревая зона расширяется в своих размерах с образованием трехмерной структуры и захватывает всю зону вблизи контакта соседних шаров. При $Re \geq 1000$ отчетливо проявляется отклонение линий тока в сторону образующегося вихря и выход из него потока в направлении основного ядра потока.

В случае теплообмена нагреваемых шаровых элементов с относительно холодным газом начало вихреобразования смещается в область больших чисел Рейнольдса. Для оценки величины смещения производился анализ фрагментов течения с линиями тока в шаровой ячейке в диапазоне температур поверхности шаров

293...923 K (Приложение А, таблица А.2) с интервалом изменения числа Рейнольдса $\Delta Re = 10$. На рисунке 2.7 приведена схема течения потока с вихреобразованием в расчетной ячейке при наличии теплообмена. Аналогичная картина затягивания отрыва потока наблюдалась при охлаждении воздухом нагретой одиночной сферы по сравнению с обтеканием в изотермических условиях [17, 104].

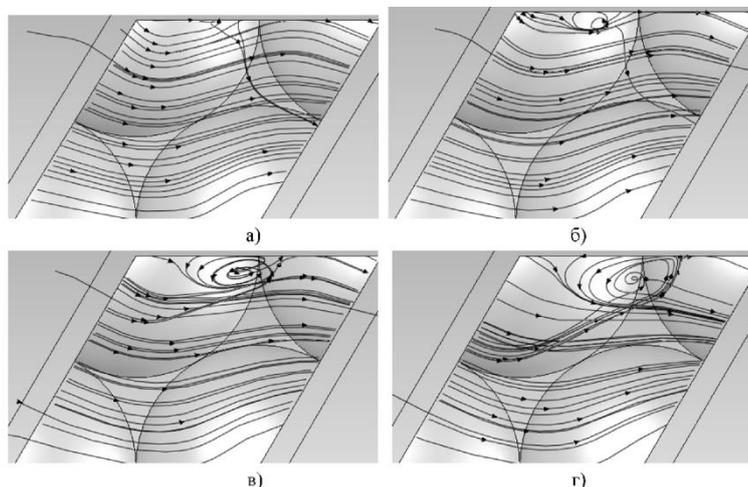


Рисунок 2.7 – Схема течения потока при наличии теплообмена нагретых шаров с холодным газом (температура поверхности шара 523 К): а) $Re=100$; б) $Re=150$; в) $Re=300$; г) $Re=1000$

Данные, характеризующие число Рейнольдса, при котором начинается вихреобразование в шаровой ячейке, в зависимости от температуры поверхности шаров, обобщены в виде экспериментальной зависимости:

$$Re_n(T) = 423 \cdot (T / T_0)^{0,31} \cdot [1 - \exp(-0,21 \cdot T / T_0)] \quad (2.16)$$

где $Re_n(T)$ – число Рейнольдса, отвечающее началу образования вихря; T – средняя температура поверхности шаров, К; $T_0 = 293$ К – температура газа (воздуха) в межшаровой области ячейки.

На рисунке 2.8 приведены значения распределения интенсивности теплоотдачи по поверхности шаровых элементов в расчетной ячейке в виде относительного числа Нуссельта $Nu_{лок}/Nu$, полученные заданием объемной плотности тепловыделения $q_V = 9,5 \cdot 10^6$ Вт/м³, что соответствует значениям энергонапряженности шаровых твэлов в газоохлаждаемых энергетических реакторах. Максимальная неравно-

мерность в распределении коэффициента теплоотдачи наблюдалась при сравнительно малых $Re \leq 300$, но с увеличением скорости потока ($Re \geq 10^3$) неравномерность заметно уменьшается, что можно объяснить возрастанием турбулентности потока и снижением на этом фоне влияния интенсивности отрывных вихрей.

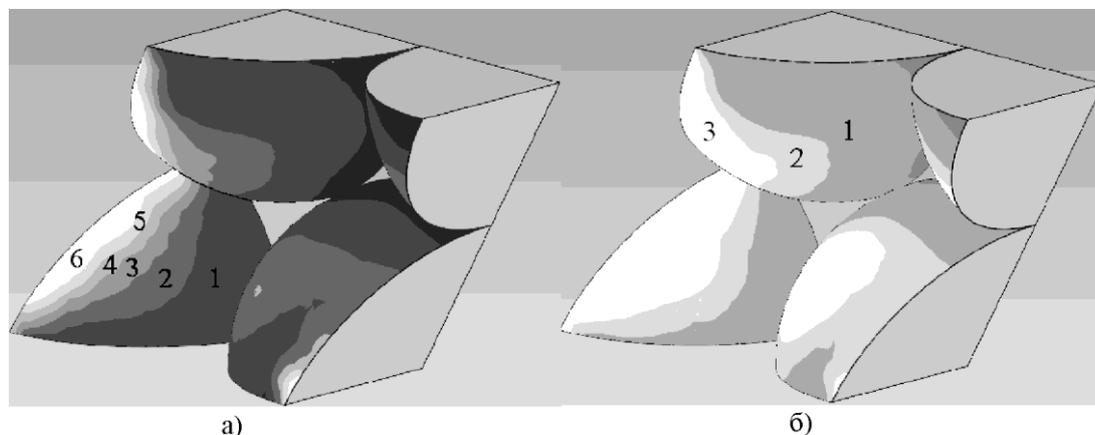


Рисунок 2.8 – Распределение относительного числа Нуссельта по поверхности тепловыделяющих шаров. Значения $Nu_{\text{лок}}/Nu$: а) $Re=300$; 1 – 1,12; 2 – 0,98; 3 – 0,81; 4 – 0,58; 5 – 0,62; 6 – 0,16; б) $Re=1000$; 1 – 1,2; 2 – 0,73; 3 – 0,36

Сравнение результатов расчета с опытными значениями Nu для слоя с ромбоэдрической упаковкой элементов показывает, что полученные данные примерно в 1,2 раза меньше экспериментальных значений [102], что, по-видимому, связано с принятым в расчетах низким уровнем начальной турбулентности потока. В то же время отношение минимальных и максимальных значений $Nu_{\text{лок}}$ укладывается в диапазон 2,2...8,0, характерный при измерениях локальных коэффициентов теплоотдачи по поверхности сферы в ромбоэдрической укладке [104].

2.5 Выводы к разделу 2

1. Проведен обзор современных методик компьютерного моделирования течения и теплообмена газа с твердым телом. Рассмотрены основные уравнения вычислительной гидродинамики и полуэмпирические модели турбулентности.

2. Выполнено моделирование обтекания одиночного шарового элемента потоком газа в изотермических условиях. Выполнено моделирование обтекания

шара, расположенного в шаровой засыпке, потоком газа. Проведено сравнение с эмпирическими данными, приведенными в работах [72, 73, 76, 83].

3. Выполнено численное моделирование течения газа в элементарной шаровой ячейке, исследована структура течения.

4. Исследовано влияние теплообмена на смещение начала вихреобразования, получена зависимость начала вихреобразования от температуры шаров.

5. Исследована теплоотдача от шаровых элементов к потоку газа в элементарной шаровой ячейке.

6. Результаты численного моделирования могут использоваться для визуализации процесса вихреобразования в элементарной шаровой ячейке.

7. Результаты численного моделирования, характеризующие свойства потока в сравнительно небольшой области слоя (расчетной ячейке), позволяют оценить условия вихреобразования и его влияния на теплообмен с элементами слоя без учета ускорения потока в направлении течения. Реальные свойства потока газа, определяемые схемой течения (осевой или радиальной) в межшаровом пространстве возможно проанализировать в целом только в результате экспериментальных исследований.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОДИНАМИКИ ПРИ РАДИАЛЬНОМ ТЕЧЕНИИ ПОТОКА ГАЗА В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ

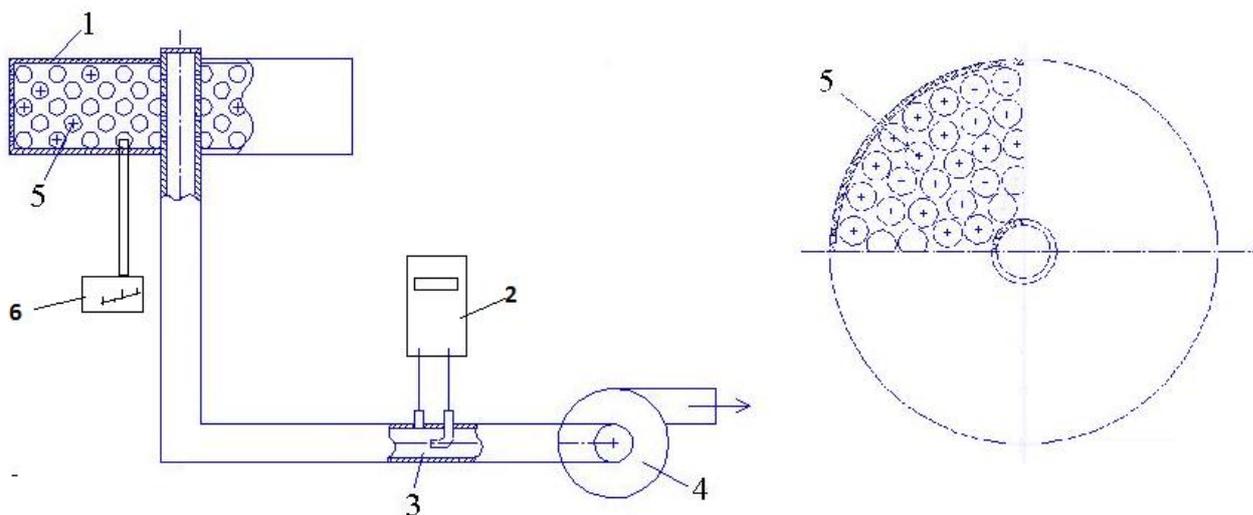
3.1 Планирование экспериментальных исследований и создание экспериментальной установки

В соответствии с целью и задачами диссертационной работы в 2007–2009 гг. была разработана блок-схема экспериментальной установки для проведения следующих исследований:

1. Измерение пульсаций статического давления в шаровой засыпке с радиальным течением газа.
2. Измерение пульсаций статического давления в шаровой засыпке с осевым течением газа.
3. Определение гидравлического сопротивления шаровой засыпки с радиальным течением газа.
4. Определение коэффициента теплоотдачи при радиальном течении газа в шаровой засыпке.
5. Определение коэффициента теплоотдачи при осевом течении газа в шаровой засыпке.

Первые две серии экспериментов направлены на выявление особенностей радиального течения газа через шаровую засыпку и анализ вихреобразования при радиальном течении с непостоянной скоростью потока. Дальнейшие исследования позволили получить ряд эмпирических соотношений, позволяющих рассчитывать газодинамическое сопротивление и коэффициенты теплоотдачи при радиальном течении потока газа в слое шаровых элементов.

Блок-схема экспериментальной установки показана на рисунке 3.1. Экспериментальная установка состоит из насадки, заполненной шаровыми элементами, подводящего трубопровода, в котором расположен узел измерения расхода воздуха, и газодувки.



1 – насадка с перфорированными чехлами; 2 – узел измерения расхода; 3 – подводный трубопровод; 4 – газодувка; 5 – шаровые элементы; 6 – измерительные приборы

Рисунок 3.1 – Блок-схема экспериментальной установки

В зависимости от серии экспериментов, установка дополнялась шаровыми датчиками и измерительными приборами.

3.2 Описание экспериментальной установки

3.2.1 Конструкция насадки с шаровыми элементами

Корпус насадки состоит из днища, к которому приклеены два коаксиальных перфорированных цилиндра. Пространство между цилиндрами заполняется шаровыми элементами в виде свободной засыпки, сверху надевается крышка. Внутренний перфорированный цилиндр имеет диаметр 28 мм, диаметр внешнего цилиндра в разных экспериментах был от 68 до 200 мм. Высота обоих цилиндров во всех случаях равнялась 55 мм. Отверстия для прохода воздуха диаметром 2 мм расположены по всей поверхности цилиндров в шахматном порядке с шагом 3 мм. Конструкция насадки показана на рисунке 3.2.

В экспериментах использовались шары трех видов (рисунок 3.3):

- 1) цельный калиброванный горох со средним диаметром 7 мм;
- 2) керамический грунт со средним диаметром 15 мм;
- 3) каучуковые шары с диаметром 22 мм.

Пористость шаровой засыпки определялась экспериментально по известной методике [22, стр. 59–62] заключающейся в измерении плотности материала частиц и насыпной плотности материала частиц в слое. В зависимости от диаметра шаров и наружного перфорированного цилиндра пористость составляла $\varepsilon = 0,31 \dots 0,44$. Подробные результаты измерений приведены в Приложении Б.

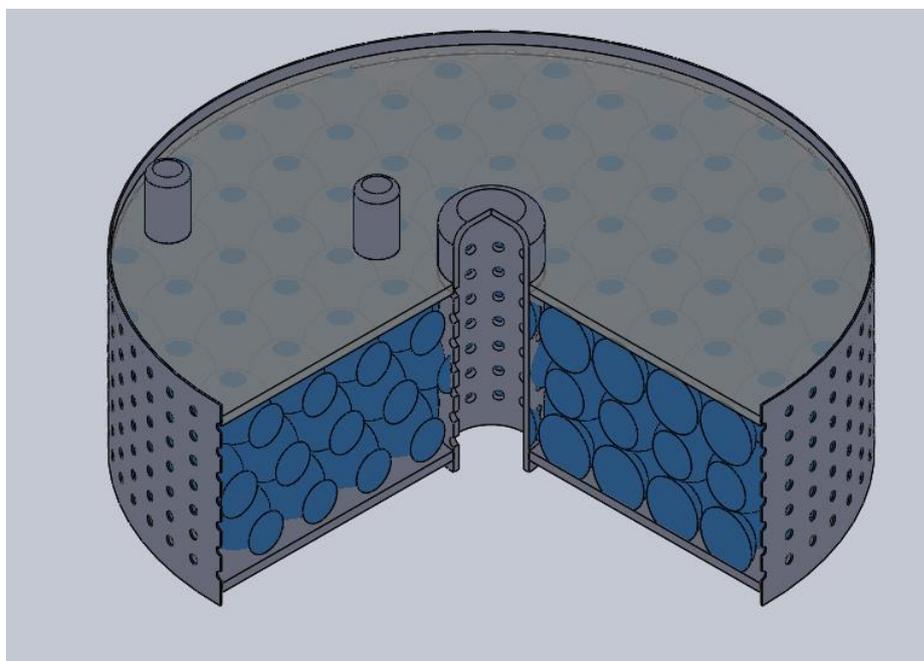


Рисунок 3.2 – Конструкция насадки



Рисунок 3.3 – Шаровые элементы со средним диаметром а) 7 мм; б) 15 мм;
в) 22 мм

Для выявления влияния ускорения или замедления потока на характеристики течения в ряде экспериментов вместо цилиндрической насадки с шаровыми элементами использовалась насадка прямоугольного сечения, схематично изображенная на рисунке 3.4.

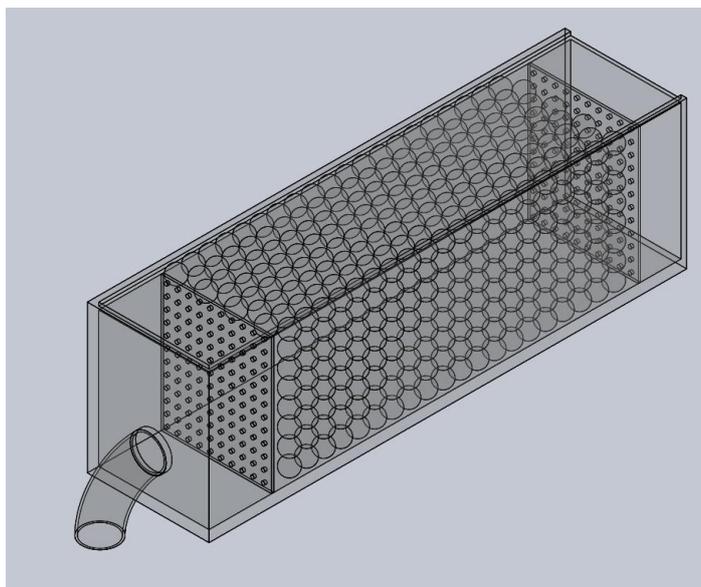


Рисунок 3.4 – Насадка с осевым течением воздуха

Шаровые элементы здесь размещены в прямоугольном корпусе сечением 95 x 120 мм.

Верхняя крышка во всех вариантах насадки является съемной, чтобы была возможность менять размер шаровых элементов и размещать шаровые датчики внутри слоя. На верхней крышке расположены штуцеры для присоединения датчиков к измерительным приборам.

3.2.2 Измерение расхода воздуха через насадку с шаровыми элементами

Газодувка, которая обеспечивает расход воздуха через насадку, может работать в двух режимах, зависящих от направления потока:

1) на выходе из внутреннего перфорированного цилиндра в трубопроводе создается разрежение, которое обеспечивает равномерное всасывание воздуха через отверстия внешнего перфорированного цилиндра (рисунок 3.5, а). Из-за того, что диаметр наружного перфорированного цилиндра больше, чем диаметр внутреннего, скорость фильтрации возрастает при движении газа с периферии к центру насадки, то есть течение является ускоренным;

2) на входе во внутренний перфорированный цилиндр создается напор, при этом течение через шаровую засыпку является замедленным (рисунок 3.5, б).

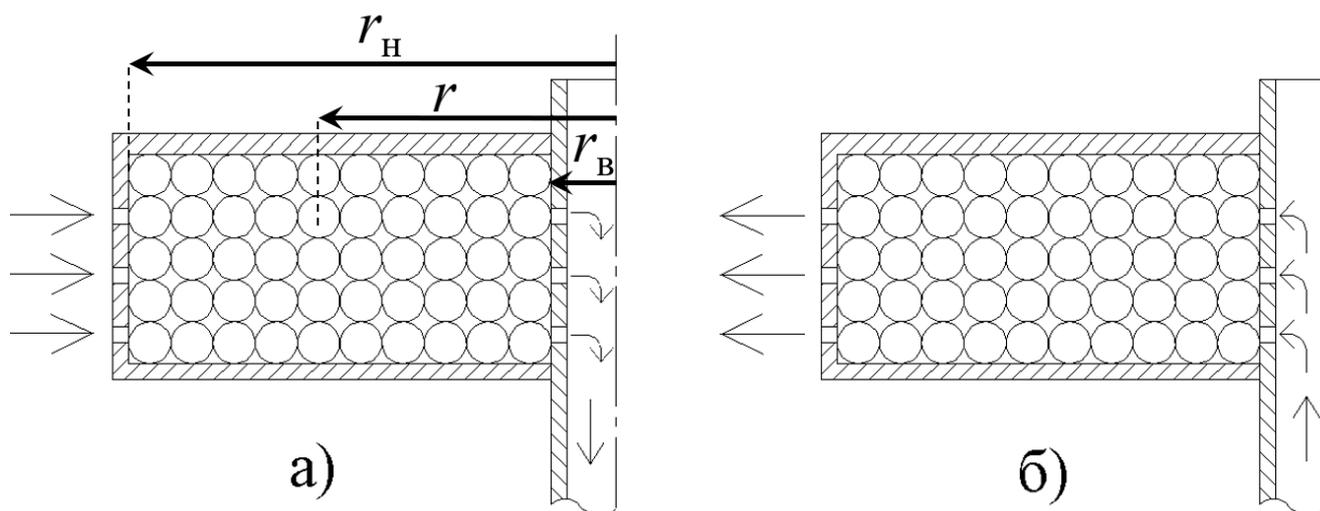


Рисунок 3.5 - Схема течения газа через шаровую засыпку при разных режимах работы газодувки: а) ускоренное течение; б) замедленное течение

Газодувка обеспечивает переменный расход воздуха, регулируемый подаваемой на нее мощностью.

В подводящем трубопроводе установки размещен узел измерения расхода. Применялась методика измерения расхода по скоростному (динамическому) напору [105, стр. 498–502, 106], основанная на измерении скорости потока и расчете расхода по известному поперечному сечению трубопровода.

Схема измерения динамического давления показана на рисунке 3.6. Трубка Пито (1), установленная на оси подводящего трубопровода открытым концом навстречу потоку (на рисунке показан вариант, когда газодувка работает в режиме всасывания), воспринимает полный напор $p_{п}$. Трубка (2) помещается в поток так, что плоскость открытого конца расположена параллельно линиям тока, и воспринимает только статическое давление $p_{ст}$. К наружным концам трубок подключен дифференциальный манометр (3), который измеряет разность полного и статического давлений, т. е. динамическое давление $p_{д} = p_{п} - p_{ст}$.

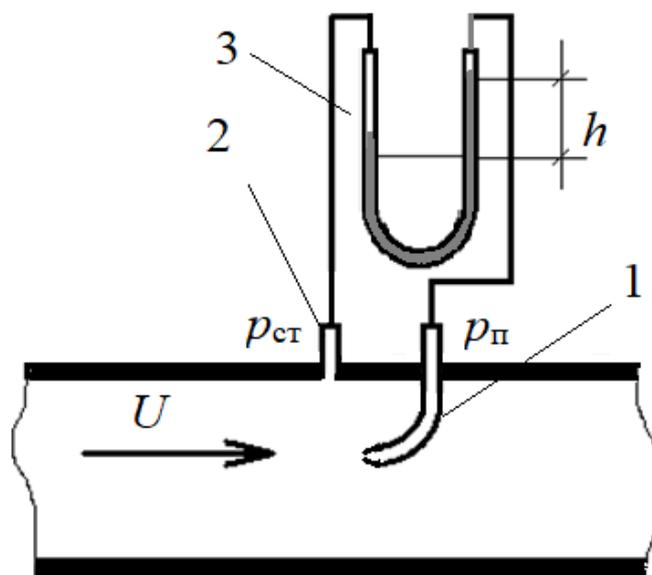


Рисунок 3.6 – Узел измерения расхода воздуха: 1 – трубка Пито; 2 – трубка для измерения статического давления; 3 – дифференциальный манометр

Диаметр трубки для измерения скоростного (динамического) напора составлял 1,5 мм при толщине стенки 0,1 мм. Диаметр подводящего трубопровода равнялся 28 мм.

Для измерения перепада давления использовался спиртовой дифманометр. Его показания h , м, обрабатывались по формуле

$$p_d = \rho_c \cdot g \cdot h \cdot k, \quad (3.1)$$

где ρ_c – плотность спирта при условиях эксперимента; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; k – коэффициент, учитывающий угол наклона спиртового дифманометра.

Зная динамическое давление, которое характеризует кинетическую энергию потока, можно определить скорость на оси потока:

$$U_{\max} = \sqrt{\frac{2p_d}{\rho_v}} \quad (3.2)$$

где $p_d = p_{\text{П}} - p_{\text{ст}}$ – динамическое давление, Па, соответствующее показаниям дифманометра; ρ_v – плотность воздуха, кг/м^3 , которая вычислялась по температуре в помещении и справочным данным [107].

Объемный расход воздуха определялся по формуле:

$$G_V = \frac{U_{\text{cp}}}{U_{\text{max}}} \cdot f \cdot \sqrt{\frac{2P_d}{\rho_B}} \quad (3.3)$$

где $U_{\text{cp}} / U_{\text{max}}$ – отношение средней по сечению трубы скорости потока к максимальной скорости потока на оси трубы; $f = \pi \cdot d_{\text{тр}}^2 / 4$ – площадь сечения подводящего трубопровода, м²; $d_{\text{тр}}$ – диаметр подводящего трубопровода.

Режим течения воздуха в трубопроводе был турбулентным с $Re_{\text{тр}} = U_{\text{cp}} d_{\text{тр}} / \nu = 2 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^5$. Согласно [107], отношение средней скорости потока к максимальной скорости на оси для турбулентного режима течения потока в трубе $Re_{\text{тр}} = 10^4 \dots 10^5$ лежит в пределах 0,79...0,82. В расчетах расхода воздуха принято постоянное значение $U_{\text{cp}} / U_{\text{max}}$, равное 0,81. С учетом этого и характеристик измерительных приборов относительная погрешность измерения расхода δ_G не превышала 3,7%.

3.2.3 Измерение перепада давления при течении воздуха через насадку с шаровыми элементами

В ходе экспериментов с помощью U -образного дифманометра измерялся перепад давления при течении воздуха через засыпку. Один приемник давления размещался во внутренней трубке насадки, а второй снаружи насадки с шаровыми элементами.

Чтобы учесть влияние перфорированных цилиндров на сопротивление течению, при таких же расходах воздуха измерялся перепад давления при течении через пустую насадку.

Перепад давления вычислялся по показаниям дифференциального манометра по формуле

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta H, \quad (3.4)$$

где ρ – плотность воды, заполняющей дифференциальный манометр, м³/кг; $\Delta H = (H - H_0)$ – перепад давления, м. вод. ст.; H – показания манометра при течении воздуха сквозь заполненную насадку, м; H_0 – показания манометра для пустой насадки тех же размеров, м.

3.2.4 Измерение пульсаций статического давления

Для выявления особенностей радиального ускоренного или замедленного течения газа через слой шаровых элементов исследовалась газодинамическая структура потока в засыпке путем измерений пульсаций статического давления и их частот [17, 108–109].

Схема измерений пульсаций статического давления показана на рисунке 3.7.

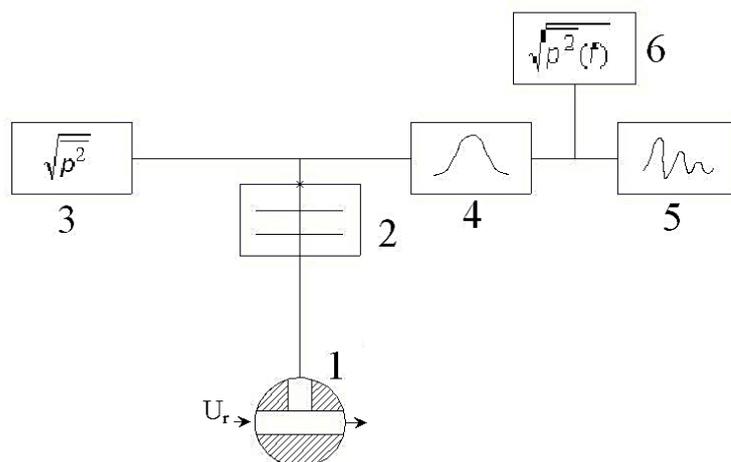


Рисунок 3.7 – Схема измерения пульсаций статического давления $\sqrt{p^2}$ и его спектра $\eta(f) = \sqrt{p^2(f)}$: 1 – шаровой приемник давления; 2 – электретный датчик давления; 3, 6 – мультиметр АРРА 109; 4 - анализатор спектра Ф582; 5 – осциллограф

Шаровые приемники статического давления имели одинаковые размеры с основными шаровыми элементами насадки и помещались внутри слоя. С помощью тонкой виниловой трубки, практически не нарушающей структуру слоя, они соединялись с электретными датчиками давления при измерении пульсационных параметров. Электретный датчик давления может применяться для измерения малых давлений и разностей давлений. В корпусе датчика расположены подвижный электрод в виде мембраны с нанесенным на нее плоским электретом и размещенный на изоляторе противоэлектрод. К противоэлектроду подключен электронный усилитель, сигнал которого подается на выпрямитель и вольтметр. К подвижному электроду через преобразователь подключен генератор электрических колебаний. Из-

меряемое давление подается в камеру датчика через штуцер, воздействует на мембрану и приводит к изменению расстояния между мембраной и противоэлектродом, вследствие чего изменяется измеряемый сигнал [110–111].

3.3 Определение коэффициента гидравлического сопротивления в условиях радиального течения газа

Потери напора при турбулентном течении в общем случае определяются по формуле Дарси-Вейсбаха. Для радиального течения газа в шаровой засыпке соотношение Дарси-Вейсбаха может быть записано в форме [21]:

$$dp = \xi_r \cdot \frac{\rho}{2d_{ш}} \left(\frac{G_V}{2\pi H} \right)^2 \cdot \frac{dr}{r^2}, \quad (3.5)$$

где G_V – массовый расход газа, м³/с, ρ – плотность газа, кг/м³; H – высота засыпки, м, r – текущее значение радиуса засыпки, м; $d_{ш}$ – диаметр шарового элемента, м.

Интегрируя соотношение (3.5), получаем расчетную формулу потери давления потока при радиальном течении газа:

$$\Delta p = \xi_r \cdot \frac{\rho}{2d_{ш}} \left(\frac{G_V}{2\pi H} \right)^2 \cdot \left(\frac{1}{r_г} - \frac{1}{r_н} \right), \quad (3.6)$$

где $r_г$ и $r_н$ – радиусы внутреннего и наружного коллекторов соответственно, м. При интегрировании принято, что плотность газа и объемный расход не зависят от текущего значения радиуса.

Аналогичное соотношение для Δp можно получить, рассматривая течение газа как осевое (плоское) с постоянной скоростью $U_{\hat{r}} = G_V / (2\pi\hat{r}H)$ на участке $\Delta r = r_н - r_г$, отнесенной к среднему сечению слоя $\hat{r} = 0,5(r_н + r_г)$. Заменяя в соотношении (3.5) дифференциалы конечными разностями (dp на Δp , dr на Δr), получим:

$$\Delta p = \xi_{\hat{r}} \cdot \frac{\rho}{8\pi^2 d_{ш}} \left(\frac{G_V}{H} \right)^2 \cdot 4 \cdot \frac{r_н - r_г}{(r_н + r_г)^2}. \quad (3.7)$$

Из сравнения полученных выражений следует, что коэффициенты гидравлического сопротивления (КГС) для радиальной ξ_r и осевой ξ_f схемы течений газа связаны между собой параметром χ в виде:

$$\begin{aligned} \xi_r &= \xi_f \cdot \chi; \\ \chi &= 4 \cdot \left(\frac{r_n}{r_e} + \frac{r_e}{r_n} + 2 \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Параметр χ учитывает влияние относительной кривизны поверхности коллекторов на гидравлическое сопротивление засыпки.

Результаты измерений коэффициента сопротивления приведены в Приложении В.

Обработка результатов измерений выполнялась в форме критериальной зависимости $\xi = f(\text{Re})$. Число Рейнольдса вычислялось в рамках внешней модели течения газа через слой шаровых элементов [21–23]. При этом используют диаметр шарового элемента в качестве характерного размера и скорость фильтрации – условную скорость течения в поровом пространстве засыпки, равную отношению объемного расхода в поперечном потоке сечении к полной площади этого сечения.

Так как площадь поперечного сечения насадки с шаровыми элементами является переменной, рассматривалось центральное сечение, соответствующее радиусу $r = (r_b + r_n) / 2$, где r_b – внутренний радиус насадки, r_n – наружный радиус насадки.

Скорость фильтрации в центральном сечении засыпки, таким образом, определялась по формуле

$$U = \frac{G_V}{\pi(r_n + r_e) \cdot l}, \quad (3.9)$$

где $H = 0,055$ м – высота засыпки, G_V – объемный расход через засыпку, м³/с. Методика измерения объемного расхода описана в п. 3.2.2.

Число Рейнольдса вычислялось по формуле:

$$\text{Re} = \frac{U \cdot d_{ш}}{\nu}, \quad (3.10)$$

где $d_{ш}$ – диаметр шарового элемента, м; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха при атмосферном давлении и температуре в помещении лаборатории ($t = 18...25^{\circ}\text{C}$), $\text{м}^2/\text{с}$.

На рисунке 3.8 приведены опытные данные по гидравлическому сопротивлению засыпки из шаровых элементов в виде зависимости ($\xi_r \cdot \varepsilon^4 \cdot \chi^{-1}$) от числа $\text{Re}_{\bar{r}}$.

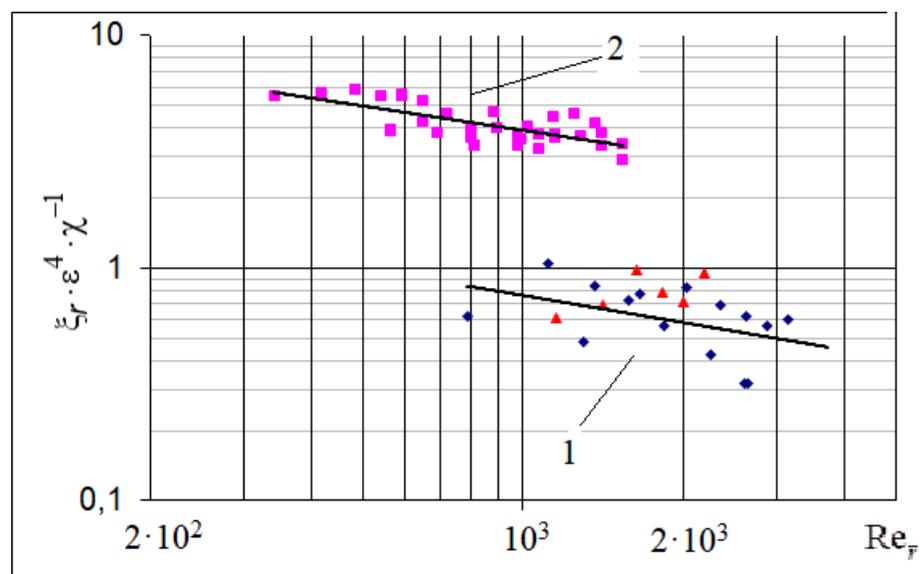


Рисунок 3.8 – Зависимость комплекса коэффициента гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса: ■ - $d_{ш} = 0,007$ м; ◆ - $d_{ш} = 0,015$ м; ▲ - $d_{ш} = 0,022$ м; 1 – формула (3.11); 2 – формула (3.12)

Обработка результатов измерений показала, что коэффициент гидравлического сопротивления засыпки ξ_r в значительной степени зависит от пористости слоя шаровой засыпки и параметра χ , который учитывает влияние относительной кривизны поверхности коллекторов. В опытах пористость менялась в зависимости от $d_{ш}$ и радиальных размеров засыпки $\Delta r = r_n - r_6$; параметр χ менялся от 0,4 до 1.

Обработка результатов измерений распределения статического давления в слое позволила получить зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от основных режимных и конструктивных параметров в виде

$$\xi_r = \frac{108}{\varepsilon^4} \cdot \text{Re}_{\bar{r}}^{-0,79} \cdot \chi; d_{ш} = 15 \text{ и } 22 \text{ мм}; 0,4 \leq \varepsilon \leq 0,44; \quad (3.11)$$

$$\xi_r = \frac{4,36}{\varepsilon^4} \cdot \text{Re}_{\bar{r}}^{-0,35} \cdot \chi; d_{ш} = 7 \text{ мм}; \varepsilon = 0,31. \quad (3.12)$$

где $Re_{\bar{r}}$ – число Рейнольдса для скорости потока в среднем сечении слоя $\hat{r} = 0,5(r_e + r_n)$.

Полученные эмпирические соотношения отражают изменение коэффициента гидравлического сопротивления в диапазоне отношений наружного и внутреннего радиусов коллекторов $3,5 \leq r_n/r_e \leq 7,1$ при изменении числа Рейнольдса, отнесенного к скорости в средней части слоя, в пределах $Re_{\bar{r}} = 3 \cdot 10^2 \dots 5 \cdot 10^4$. Среднеквадратичная погрешность аппроксимации не превышала 13% для $d_{ин} = 15$ и 22 мм и 22% для слоя с $d_{ин} = 7$ мм в связи с худшими газодинамическими характеристиками приемников статического давления малых размеров.

Значения коэффициента гидравлического сопротивления для осевой (плоской) схемы течения потока при числе Рейнольдса $Re_{\bar{r}} = 10^3$, представленные в виде комплекса $\xi \cdot \varepsilon^4$, меняются в пределах 0,46...0,85 в зависимости от способа укладки шаровых элементов слоя [22]. В случае радиального течения газа в слое при сравнительно малой относительной кривизне коллекторов $r_n/r_e \leq 1,25$ ($\chi \approx 1$), значения $\xi \cdot \varepsilon^4 \cdot \chi^{-1}$ составляют 0,45...0,5, но при $r_n/r_e = 3 \dots 7$ возрастают от 0,61 до 1,07, что связано с изменением структуры потока в направлении его течения и принятой схемой расчета коэффициента гидравлического сопротивления.

Отличие значений показателя степени при $Re_{\bar{r}}$ в формулах (3.11) и (3.12) позволяет предположить различное проявление эффекта ускоренного течения потока газа в слое с неодинаковой пористостью ε и диаметром шаровых элементов, влияющих на изменение уровня турбулентности и коэффициента трения потока в слое.

Полученные формулы (3.7), (3.11) и (3.12) целесообразно использовать для расчетов потери давления в слое шаровых элементов при радиальной раздаче газа, когда необходимо учитывать влияние относительной кривизны поверхности раздающего и приемного коллекторов, т. е. при $r_n/r_e \geq 1,25$.

3.4 Исследования пульсаций статического давления потока в шаровой засыпке

Интенсивность пульсаций статического давления является одним из параметров, определяющих свойства потока в слое шаровых элементов. Она непосредственно связана с отрывными характеристиками вихрей, развивающихся на поверхности шаров и создающих импульсы давления каждый раз при их срыве с поверхности в поток [112].

Относительная энергия пульсационного давления измерялась как отношение

$$\eta = \sqrt{\bar{p}^2} / q, \quad (3.13)$$

где $\sqrt{\bar{p}^2}$ – среднеквадратичный уровень пульсации статического давления на поверхности шара;

$$q = 0,5 \rho_r U_r^2 \quad (3.14)$$

– динамический напор; $U_r = G_V / (2\pi rH)$ – местная скорость потока при отсутствии шарового слоя.

Комплекс η зависит от числа Рейнольдса, напряжения трения τ_w на поверхности обтекаемых элементов и коэффициента сопротивления трения c_f . Значение η указывает на эффективность превращения кинетической энергии скоростного напора в энергию пульсационного давления [113].

Среднеквадратичные уровни пульсаций статического давления измерялись с помощью пьезокерамических (или электретных) датчиков давления с чувствительностью 7 мВ/Па. Динамический напор $0,5 \rho_r U_r^2$ определялся по значениям скорости потока, найденным с помощью U -образного дифманометра.

Измерения осуществлялись в следующих условиях:

– радиальное течение потока газа в слое шаровых элементов диаметром 7, 15 и 22 мм, с размещением микроприемников давления внутри шаровой засыпки вблизи внутреннего и внешнего распределительных коллекторов, а также в центральной области установки (рисунок 3.9);

– осевое течение потока в слое шаровых элементов диаметром 15 мм;

– обтекание одиночной сферы потоком воздуха.

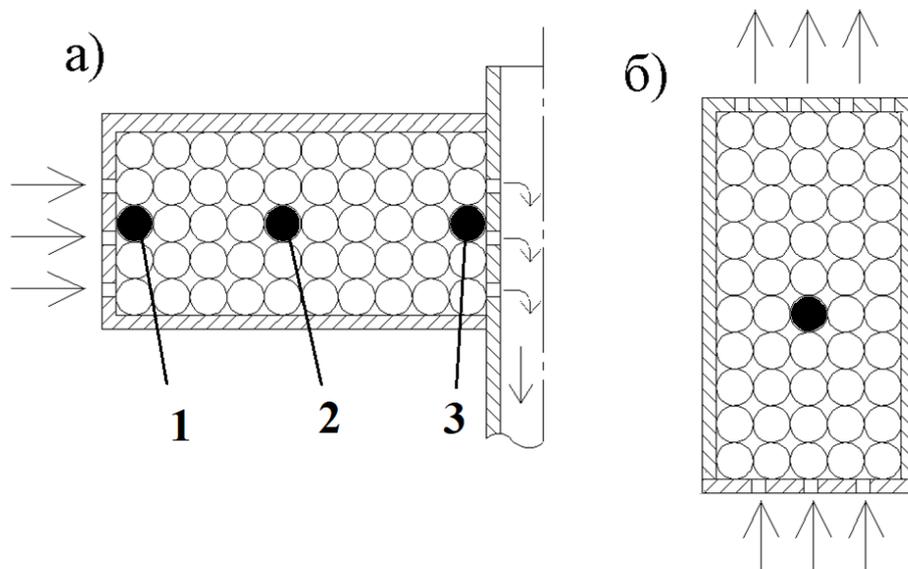


Рисунок 3.9 – Схема размещения микроприемников давления в шаровой засыпке с радиальным (а) и осевым (б) течением газа: 1 - $r/r_B = 1,3$; 2 - $r/r_B = 3$; 3 - $r/r_B = 4,8$

В случае радиального течения число Рейнольдса определялось по местной скорости потока (в рассматриваемом сечении) в отсутствие шарового слоя U_r . При осевом сечении потока скорость U также рассчитывалась в отсутствие шарового слоя. Результаты измерений пульсаций статического давления приведены в Приложении Г.

На рисунке 3.10 представлены результаты измерений в виде зависимости относительной интенсивности пульсаций статического давления от числа Рейнольдса.

При радиальном течении, как это видно из рисунка 3.10, параметр $\eta = \sqrt{\bar{p}^2} / q$ менялся в широких пределах 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 [17]. В то же время при осевом течении воздуха значение параметра η менялось незначительно от скорости течения в разных точках в направлении движения потока и практически совпадало с предыдущим случаем при $Re \geq 2 \cdot 10^3$.

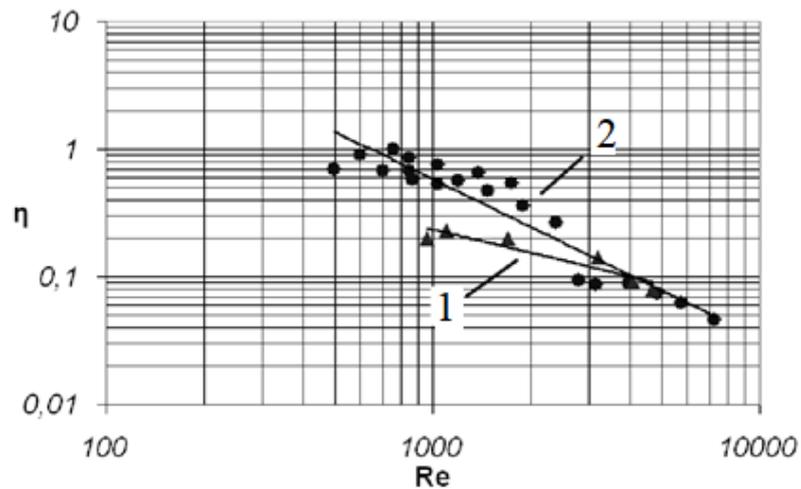


Рисунок 3.10 – Изменение относительной интенсивности пульсаций статического давления от числа Рейнольдса: 1, ▲ – осевая схема течения; 2, ● – радиальная схема течения (единые обозначения для всех $r/r_b = 1,3; 3; 4,2; 4,8$).

На рисунке 3.11 представлена зависимость относительной интенсивности пульсаций статического давления от координаты расположения приемников давления вдоль радиуса экспериментальной установки r/r_0 .

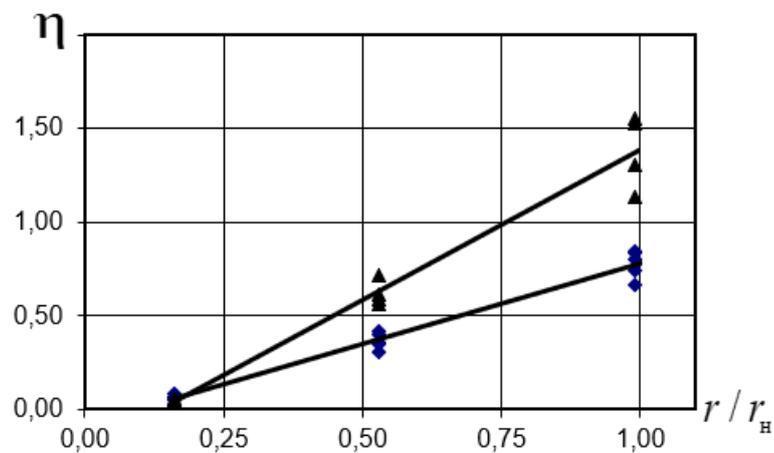


Рисунок 3.11 – Изменение относительной интенсивности пульсаций давления потока от радиальной координаты шарового слоя ($G_v/H = 0,51 \text{ м}^2/\text{с}$):

▲ – $d_{ш} = 0,015 \text{ м}$; ◆ - $d_{ш} = 0,007 \text{ м}$

Уменьшение относительной интенсивности пульсаций статического давления потока по мере его ускоренного течения через шаровой слой непосредственно связано с возрастанием радиальной скорости потока. Изменение гидравлического

сопротивления ξ имеет аналогичный характер, что говорит об отрывном механизме течения вблизи поверхности шаров при общей турбулентности потока в межшаровой области.

На рисунке 3.12 приведен частотный спектр интенсивности пульсаций статического давления по отношению к соответствующему динамическому напору в виде $S(f)=p^*(f)/q$ для $Re = 1,2 \cdot 10^3$. Здесь $p^* = \sqrt{\overline{p^2}}$.

Максимальным значениям в спектрах $S(f)$ отвечает характерная частота вихреобразования, принимающая значение 95 Гц для радиальной схемы течения, 45 Гц и 36 Гц для осевой схемы и обтекания одиночной сферы. С возрастанием числа Рейнольдса значения частоты вихреобразования также возрастают и достигают 110 Гц, 75 Гц и 55 Гц соответственно при $Re = 4,9 \cdot 10^3$.

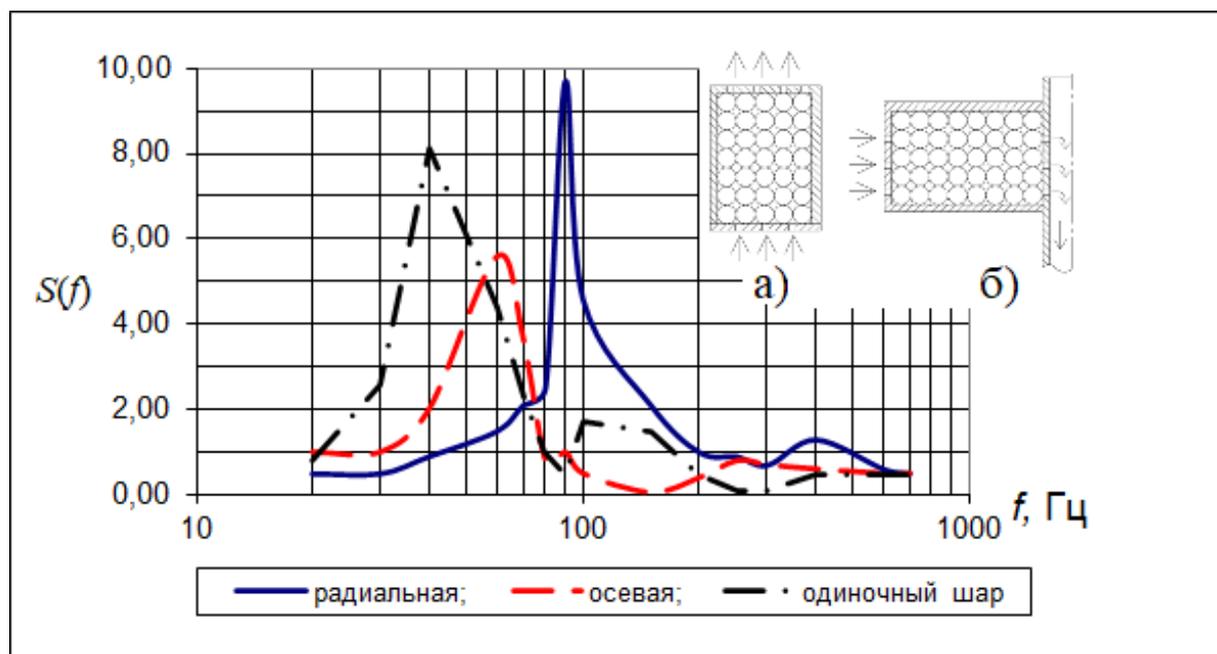


Рисунок 3.12 – Частотный спектр пульсаций статического давления в зависимости от схемы течения газа: 1, а – осевая схема; 2, б – радиальная схема; 3 – одиночный шар

Следует отметить, что пульсации статического давления потока непосредственно связаны с процессом вихреобразования, развивающегося на поверхности шаров и создающим импульсы давления каждый раз при срыве вихрей с поверхно-

сти в поток [114]. Поэтому численные значения η больше, чем степень турбулентности газового потока в межшаровой области течения, где происходит диссипация оторвавшихся вихрей.

Обобщенным параметром вихреобразования служит число Струхалия Sh , которое непосредственно связано с генерацией крупномасштабных вихрей, соответствующих частотам f с максимальными значениями интенсивности пульсаций в спектрах $S(f)$ [76, 77, 82, 115]. При анализе вихреобразования как отрывного течения вблизи поверхности тел имеет смысл определять число Струхалия в виде:

$$Sh = f \cdot d_{ш} \cdot \varepsilon / U, \quad (3.15)$$

где f – частота; $d_{ш}$ – диаметр шарового элемента, ε – пористость (в данной работе $\varepsilon = 0,39$), U – средняя скорость течения в межшаровом пространстве.

Между числом Струхалия, характеризующим процесс генерации крупномасштабных вихрей, и интенсивностью пульсаций давления существует непосредственная связь [116]:

$$Sh = \beta \cdot \eta^{0,5}, \quad (3.16)$$

где β – численный коэффициент.

Вихреобразование, связанное с отрывом потока, наиболее подробно исследовано на примере одиночной сферы при безградиентном ее обтекании [112]. В то же время отрыв потока, а, следовательно, и вихреобразование не наблюдалось при обтекании струями, размер которых меньше диаметра сферы [24]. Результаты исследований [29–30], связанные с визуализацией структуры течения газа в межшаровом пространстве, а также измерение локальных скоростей потока, свидетельствуют о наличии вихревых структур с частотой пульсаций, определяемой числом Струхалия $Sh = 0,5$, что способствует общей турбулизации основного ядра потока путем периодических выбросов массы газа из непроточной зоны в проточную. Подобный механизм обмена массой и энергией между вихревой зоной и основным потоком подробно рассматривался при течении среды вдоль плоской поверхности с лунками или траншеями, используемыми для увеличения интенсивности теплоотдачи [117].

Диапазон пульсаций давления содержит как широкий частотный спектр собственно турбулентного течения потока, так и характерные значения частоты срыва

вихрей, отвечающих числу Струхалия, энергетический уровень которых на порядок выше, чем уровни турбулентных пульсаций. Изменение числа Sh в направлении потока газа показано на рисунке 3.13. Здесь $r^* = r/r_B$ и $x^* = x/l$ – безразмерные координаты для радиального и осевого течения газа.

Из рисунка 3.13 видно, что характер вихреобразования, определяемый числом Струхалия, линейно падает в направлении радиального течения газа при соответствующем возрастании числа $Re_r \sim 1/r$, в то время как в случае осевого течения потока меняется незначительно. Диапазон характерных частот как в первом, так и во втором случаях составлял 60...90 Гц при $Re_r \leq 5 \cdot 10^2$ и возрастал до 140...220 Гц с увеличением числа Рейнольдса.

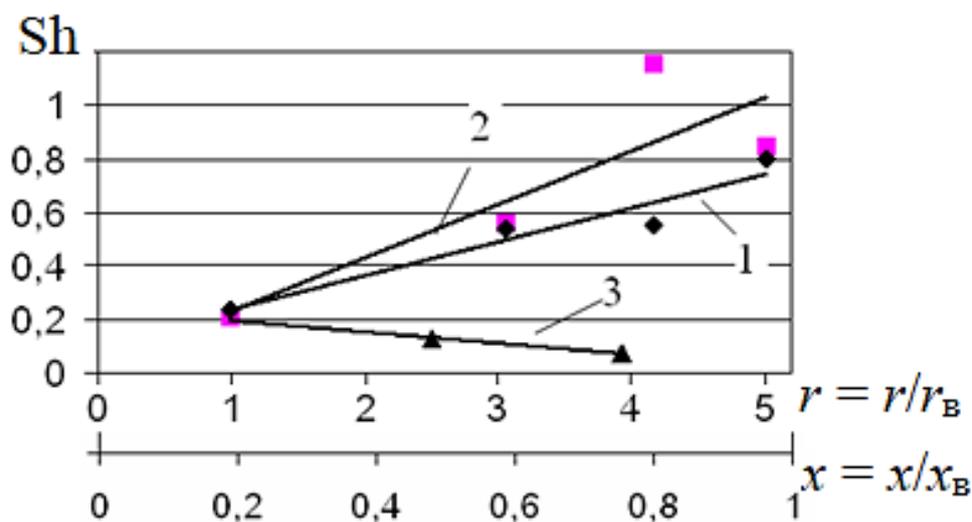


Рисунок 3.13 – Изменение числа Струхалия в направлении потока газа: 1 – радиальное течение, $G_V/H=0,36 \text{ м}^2/\text{с}$, 2 – $G_V/H=0,66 \text{ м}^2/\text{с}$, 3 – осевое течение, $Re = 10^3$

На рисунке 3.14 представлена зависимость числа Струхалия от числа Рейнольдса. Значения Sh меняются существенным образом для радиального течения потока от 0,62 до 0,11 с ростом Re , что в данном случае связано с проявлением эффекта реламинаризации при ускоренном течении. Эффект реламинаризации потока связан с изменением его структуры в пограничном слое на поверхности обтекания, причем условием его проявления является значительный градиент скорости в направлении течения. При этом турбулентный пограничный слой по своим свой-

ствам становится ближе к ламинарному вследствие подавления механизма турбулентного переноса, что ведет к снижению теплового потока и сопротивления трения [118–120].

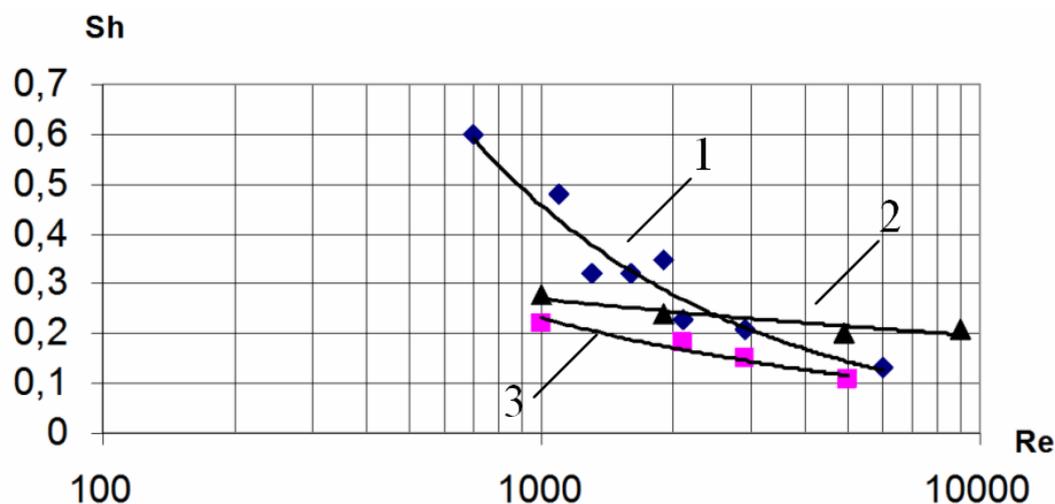


Рисунок 3.14 – Изменение числа Струхала в зависимости от скорости потока:
1 – радиальная схема; 2 – осевая схема; 3 – одиночный шар

Параметром реламинаризации в схеме с радиальным течением потока служит величина [16–17, 118–119]

$$K = \frac{\nu}{U_r^2} \cdot \frac{dU_r}{dr} = 2\pi\nu \left(\frac{G_V}{H} \right)^{-1} > 2 \cdot 10^{-6}, \quad (3.17)$$

где $U_r = G_V / (2\pi rH)$ – местная скорость потока в шаровом слое, отнесенная к полному сечению установки, не занятому слоем шаров; G_V/H – объемный расход газа на единицу высоты слоя; ν – кинематическая вязкость газа.

В опытах значение параметра K менялось в пределах $12 \cdot 10^{-6} \dots 35 \cdot 10^{-6}$ в зависимости от расхода воздуха в установке, что заметно превосходило пороговое значение $K = 2 \cdot 10^{-6}$ проявления эффекта реламинаризации в данных условиях течения потока.

Для осевой схемы течения с постоянной скоростью потока, как и для одиночной сферы в потоке газа, значения Sh изменялись с возрастанием Re в гораздо меньшей степени.

Измерения пульсаций давления в пяти точках слоя при радиальной и осевой схемах течения газа позволили аппроксимировать опытные данные с погрешностью, которая не превышала 8-11 %, в виде степенной зависимости:

$$\text{Sh} = 15,5 \cdot \text{Re}_r^{-0,6} \chi^{-1,3}; \text{Re}_r = U_r d_{ш} / \nu, \quad (3.18)$$

где ν – кинематическая вязкость газа, м²/с; $d_{ш}$ – диаметр сферических элементов, м; U_r – скорость потока при отсутствии шаровой насадки в канале, м/с; r – текущее значение координаты в направлении ускорения течения потока в пределах $r_в < r < r_н$ (внутреннего и наружного радиусов установки).

Параметр χ , как и в формуле (3.8), характеризует изменение структуры потока в связи с его ускоренным течением в направлении от раздаточного коллектора к приемному, что сопровождается снижением интенсивности пульсаций статического давления в межшаровом пространстве слоя и, следовательно, уменьшением пульсационной составляющей скорости и энергии турбулентности, а также снижением доли энергии в области крупномасштабных вихревых структур и увеличением доли в высокочастотной части спектра $S(f)$.

Для осевой схемы течения потока в слое с постоянной скоростью, а также при обтекании одиночной сферы в потоке значение параметра χ равно 1.

3.5 Выводы к разделу 3

1. Выполнено планирование экспериментальных исследований, разработана методика экспериментальных исследований, создана экспериментальная установка для исследования осевого и радиального течения газа в шаровой засыпке.

2. Проведено исследование коэффициента гидравлического сопротивления при радиальном и осевом течении газа, выполнено сравнение полученных результатов с данными других авторов.

3. Радиальная схема течения газового потока в слое характеризуется снижением гидравлического сопротивления в 2–3 раза по сравнению с осевой схемой течения как при ускоренном, так и при замедленном течении потока.

4. Получены эмпирические соотношения для коэффициента гидродинамического сопротивления в диапазоне отношений наружного и внутреннего радиусов

коллекторов $3,5 \leq r_H/r_6 \leq 7,1$ при изменении числа Рейнольдса в пределах $Re_{\bar{r}} = 3 \cdot 10^2 \dots 5 \cdot 10^4$.

5. На основании анализа литературных источников выбрана характеристика процесса вихреобразования – относительная энергия пульсационного давления. Выполнено исследование пульсаций статического давления при осевом и радиальном течении газа через шаровую засыпку.

6. Обнаружено возникновение эффекта реламинаризации, связанного с изменением средней скорости газового потока при радиальном течении в шаровом слое. Возникновение эффекта реламинаризации сопровождается уменьшением относительной интенсивности пульсаций статического давления. Генерация крупномасштабных вихревых структур и частота их образования характеризуется числом Струхала, значения которого почти линейно падают в направлении радиального течения потока, в то время как в случае осевого течения меняются незначительно.

7. Проведена обработка экспериментальных данных в форме безразмерного критерия Струхала. Получена эмпирическая зависимость числа Струхала от числа Рейнольдса и геометрических характеристик шаровой засыпки с радиальной схемой течения.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ РАДИАЛЬНОМ ТЕЧЕНИИ ПОТОКА ГАЗА В ЗЕРНИСТОМ СЛОЕ

4.1 Описание экспериментальной установки и методики измерения коэффициента теплоотдачи

Для исследования теплообмена при радиальном течении потока газа в слое шаровых элементов и определения коэффициента теплоотдачи использовалась экспериментальная установка с шаровой засыпкой, описание которой приведено в разделе 3.2.

Значения коэффициента теплоотдачи определялись по нестационарной методике [105] с предварительным нагревом медных шаров-калориметров, которые затем помещались между шарами слоя и продувались воздухом. Схема измерения коэффициента теплоотдачи медного шара-калориметра показана на рисунке 4.1.

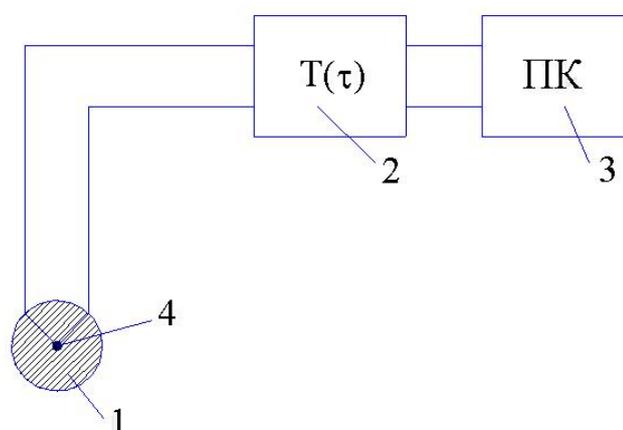


Рисунок 4.1 - Схема измерения коэффициента теплоотдачи шара-калориметра в слое: 1 – медный шар-калориметр; 2 – микровольтнаноамперметр Ф136 или мультиметр АРРА 109; 3 – компьютер с аналого-цифровым преобразователем; 4 – X-A термопара

Диаметр медного шара-калориметра в опытах равнялся диаметру основных элементов слоя, т. е. 7, 15 или 22 мм (рисунок 4.2).

Число Bi для шара-калориметра в засыпке [96]

$$Bi = \frac{\alpha \cdot d_{ш}}{\lambda_M} = \frac{\alpha \cdot d_{ш}}{\lambda_B} \cdot \frac{\lambda_B}{\lambda_M} = Nu \cdot \frac{\lambda_B}{\lambda_M}; Nu = \frac{\alpha \cdot d_{ш}}{\lambda_B}, \quad (4.1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от шара-калориметра к потоку воздуха, Вт/(м²·К), $d_{ш}$ – диаметр шарового элемента, м; λ_B и λ_M – коэффициенты теплопроводности воздуха и меди, соответственно.



Рисунок 4.2 – Фотография медных шаров-калориметров разного диаметра

В рассматриваемом диапазоне температур (20...100°C) коэффициенты теплопроводности воздуха $\lambda_B = 0,0259...0,0319$ Вт/(м·К) [121] и меди $\lambda_M = 395...392$ Вт/(м·К) [122].

В диапазоне чисел $Nu \leq 1000$, характерных для рассматриваемого процесса [21, 23], максимальное значение числа Био

$$Bi_{max} = \frac{\lambda_B}{\lambda_M} Nu = \frac{0,0319}{392} \cdot 1000 = 0,0814. \quad (4.2)$$

При значениях $Bi < 0,1$ температура на поверхности шара практически равна температуре в центре шара [76, 96].

Общее уравнение конвективного теплообмена шара с потоком газа можно записать как [76, 123]

$$c_{pM} \rho_M V_{ш} \frac{dT}{d\tau} = \alpha \cdot F_{ш} \cdot (T - T_r), \quad (4.3)$$

где c_{pM} – теплоемкость материала шаров, Дж/(кг·К); ρ_M – плотность материала шаров, кг/м³; $V_{ш}$ – объем шара, м³; $F_{ш}$ – площадь поверхности шара, м²; $V_{ш}/F_{ш} = d_{ш}/6$; T – температура поверхности шара, К; T_r – температура газа, К; τ – время, с.

В диапазоне температур эксперимента значения теплоемкости и плотности материала шаров-калориметров (меди) можно принять постоянными и равными соответственно $c_{pm} = 382$ Дж/(кг·К); $\rho_m = 8930$ кг/м³ [122].

Преобразовывая формулу (4.3), получим выражение для вычисления коэффициента теплоотдачи по результатам охлаждения шара-калориметра:

$$\alpha_i = \frac{c_{pm} \rho_m d_{ш}}{6} \cdot \frac{1}{\Delta \tau} \ln \frac{T_{i+1}^*}{T_i^*}, \quad (4.4)$$

где $T_i^* = T(\tau_i) - T_r$ – разность температур газа и шара в момент времени τ_i ; i – номер измерения; $\Delta \tau$ – интервал времени между замерами, с.

Так как в формуле (4.4) используется отношение температур T_{i+1}^*/T_i^* , при обработке экспериментальных данных в формулу подставлялось термоЭДС $E = f(T - T_r) = f(T^*)$.

Например, в опыте с шарами диаметром $d_{ш} = 0,015$ м получены следующие значения: $E_1 = 1,828$ мВ; $E_2 = 1,539$ мВ. Интервал времени между измерениями равнялся 10 с.

Тогда, подставляя эти значения в формулу (4.4), получим:

$$\alpha_1 = \frac{c_{pm} \rho_m d_{ш}}{6} \cdot \frac{1}{\Delta \tau} \ln \frac{E_2}{E_1} = \frac{380 \cdot 8940 \cdot 0,015}{6} \cdot \frac{1}{10} \ln \frac{1,828}{1,539} = 146,1 \frac{Вт}{м^2 К}.$$

Значения коэффициента теплоотдачи усреднялись по формуле:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \alpha_i, \quad (4.5)$$

где n – количество измерений.

Число Нуссельта для каждого диаметра шара вычислялось по среднему значению коэффициента теплоотдачи $\bar{\alpha}$:

$$Nu_r = \frac{\bar{\alpha} d_{ш}}{\lambda_b}. \quad (4.6)$$

Для сравнения проводились аналогичные измерения на установке с осевым течением газа, которая описана в разделе 3. В экспериментах использовался шар-калориметр диаметром 15 мм, диаметр основных элементов засыпки также равнялся 15 мм.

4.2 Исследование теплоотдачи от шара-калориметра в засыпке с радиальным течением газа

Была приведена серия экспериментов, в ходе которых определялся коэффициент теплоотдачи от шара-калориметра к потоку газа при радиальном течении через шаровую засыпку. Шар-калориметр размещался в засыпке в разных положениях относительно внутреннего радиуса: отношение радиуса r , на котором размещался шар-калориметр, к внутреннему радиусу засыпки $r_{в}$, изменялось в пределах от 1,3 до 4,8.

Результаты экспериментальных исследований приведены в приложении Г. Обработка экспериментальных данных проводилась в виде зависимости числа Нуссельта при радиальном течении Nu_r от числа Рейнольдса Re_r в разных положениях шара-калориметра относительно внутреннего радиуса установки. Число Рейнольдса определялось по диаметру шарового элемента и средней скорости U_r в рассматриваемом сечении.

Результаты экспериментов представлены на рисунке 4.3 в виде зависимости числа Нуссельта при радиальном течении Nu_r от числа Рейнольдса Re_r в разных положениях шара-калориметра относительно внутреннего радиуса установки. Для сравнения на графике приведены данные, полученные [21; 23] для осевого течения.

Как видно из рисунка 4.3, в отличие от коэффициента гидродинамического сопротивления как интегральной гидродинамической характеристики всего слоя, значения коэффициента теплоотдачи определяются не только от местным числом $Re_r = U_r d_{ш}/\nu$, но и положением шаров-калориметров в направлении течения потока, т.е. $r/r_{в}$. Вблизи внутреннего (приемного) коллектора при $r/r_{в} = 1,3$ наблюдалось уменьшение интенсивности теплообмена на 15-20% по сравнению с областью $r/r_{в} = 4,2...4,8$ вблизи внешнего (входного) коллектора, что связано с 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 $r_{в} < r < r_{н}$ и практически совпадал с соответствующими значениям для осевой схемы течения потока газа в слое [23]. Влияние геометрического

фактора на теплоотдачу в дальнейшем учитывалось параметром χ_r , который использовался в работе [118] в качестве характеристики радиального течения потока.

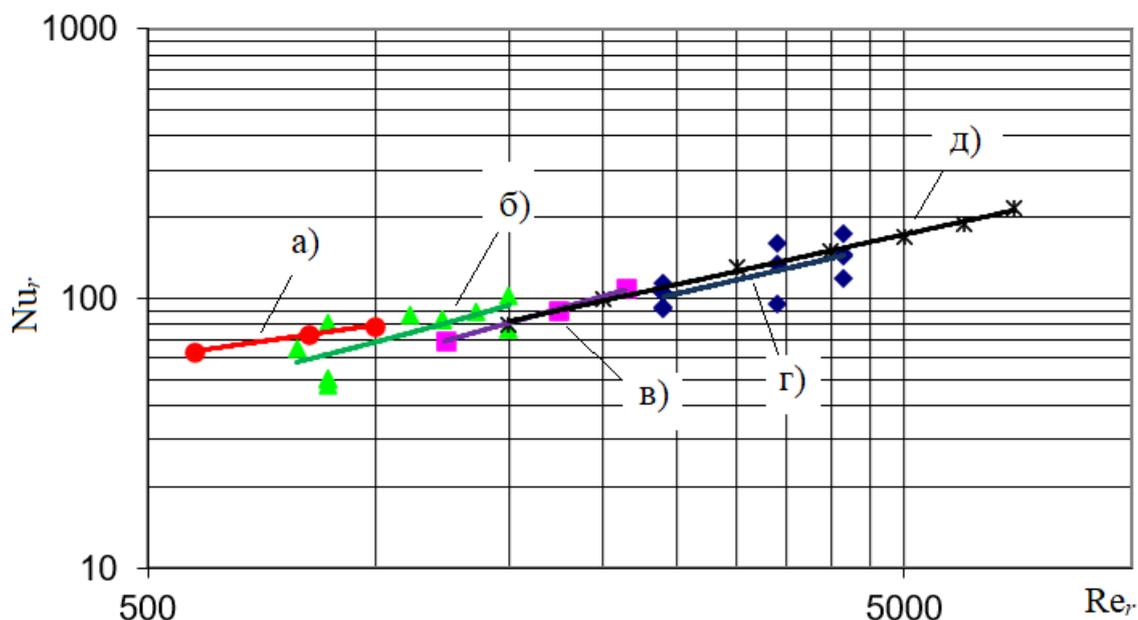


Рисунок 4.3 – Зависимость теплоотдачи шара-калориметра от числа Re_r при различном его положении внутри установки относительно внутреннего радиуса r_B , r/r_B : а – 4,8; б – 4,2; в – 3,0; г – 1,3; д – данные [21; 23]

Анализ зависимости опытных данных коэффициента теплоотдачи от положения шара-калориметра в установке показывает, что на теплообмен оказывает влияние взаимодействие следующих факторов:

- возрастание интенсивности вихреобразования и увеличение турбулентности потока в межшаровой области слоя способствуют интенсификации теплообмена;
- реламинаризация потока приводит к уменьшению теплопереноса в пограничном слое.

При обобщении полученных результатов по теплообмену шаров различного диаметра в качестве масштабной величины использовалось выражение, отвечающее осевому течению теплоносителя [23]:

$$Nu_0 = c \frac{(1-\varepsilon)^{0,33}}{\varepsilon} \cdot Re^n, \quad (4.7)$$

где c и n – численные коэффициенты.

В результате получено соотношение, учитывающее все перечисленные факторы, связанные с особенностью радиального течения газа, в виде:

$$\begin{aligned} \text{Nu}_r &= 0,36 \frac{(1-\varepsilon)^{0,33}}{\varepsilon} \cdot \chi^{-1,6} \text{Re}_r^{0,62}; \quad \text{Re}_r = \frac{G_V}{2\pi H} \cdot \frac{d_{\text{ш}}}{r \cdot \nu}; \\ \text{Nu}_r &= \frac{\alpha_r d_{\text{ш}}}{\lambda}; \quad \chi_r = 4 \cdot \left(\frac{r}{r_B} + \frac{r_B}{r} + 2 \right)^{-1}, \end{aligned} \quad (4.8)$$

где α_r – местное значение коэффициента теплоотдачи в области $r_B < r < r_H$; λ – коэффициент теплопроводности газа; индекс « r » относится местному значению искомого параметра; $d_{\text{ш}}$ – диаметр шаровых элементов в слое.

Параметр χ_r , в отличие от χ , отражающего свойства относительной кривизны поверхности коллекторов, учитывает влияние местного ускорения потока газа, меняющегося пропорционально r^{-1} , на характер течения, определяемый местным числом Рейнольдса.

Полученное соотношение (4.8) при малой относительной кривизне коллекторов $r/r_B \leq 1,25$ и $\chi_r \approx 1$ и переходит в формулу коэффициента теплоотдачи при осевом течении газа в слое (4.7).

На рисунке 4.8 представлено сопоставление опытных данных по теплоотдаче шаровых элементов различного диаметра ($d_{\text{ш}} = 7, 15$ и 22 мм) с аппроксимирующей формулой (4.8). Для зависимости 4.8 коэффициент A равен $A = \chi^{1,6} \cdot \varepsilon / (1-\varepsilon)^{0,33}$, $Nu = Nu_r$. Для сравнения там же приведена экспериментальная зависимость, полученная [23], для которой $A = \varepsilon^{1,125} / (1-\varepsilon)^{0,33}$. Из рисунка 4.4 видно, что выражение (4.8) удовлетворительно отражает зависимость теплообмена шаров различного диаметра в диапазоне чисел Рейнольдса $5 \cdot 10^2 \dots 1 \cdot 10^4$ с погрешностью, не превышающей 28%.

Достаточно простая структура формулы (4.8) позволяет оценить распределение коэффициента теплоотдачи и температуру отдельных шаровых твэлов в различных внутренних зонах энергетических реакторов и энерготехнологических установок с шаровыми элементами в зависимости от схемы течения газового теплоносителя при меняющейся скорости потока в радиальном направлении.

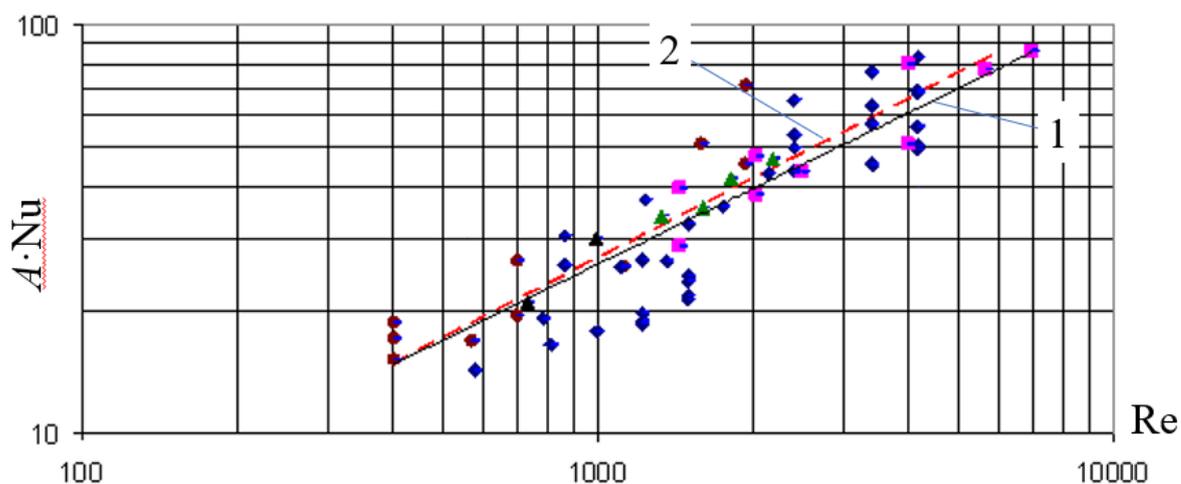


Рисунок 4.4 – Сопоставление опытных данных по теплоотдаче шаровых элементов различного диаметра ($d_{ш} = 7, 15$ и 22 мм) с аппроксимирующей формулой (4.8): 1 - аппроксимирующая формула (4.8); 2 – экспериментальная зависимость, полученная [23]

4.3 Влияние направления течения при радиальной схеме течения газового потока

Радиальное течение газа в слое шаровых элементов сопровождается либо ускорением потока в направлении от раздаточного коллектора большего радиуса к приемному коллектору меньшего радиуса (конфузорный режим), либо торможением потока при течении газа в обратном направлении (диффузорный режим). В зависимости от конструктивного оформления энерготехнологических установок, падение давления $dp/dr < 0$ стабилизирует пограничный слой на шаровой поверхности, в то время как увеличение давления $dp/dr > 0$ понижает устойчивость пограничного слоя. В условиях значительного ускорения потока при значениях параметра ускорения $K > 10^{-6}$ эффект реламинаризации оказывает значительное влияние как на характер вихреобразования потока в межшаровой области слоя и на общий уровень его турбулентности, так и на протекание процессов теплообмена между газом и насадкой [17].

Исследования по теплообмену трубных пучков, помещенных в каналы с диффузорным режимом течения (торможение потока) [124], показали, что интенсив-

ность теплоотдачи в этих условиях в 1,2...1,5 раза выше, чем при конфузормом режиме течения (ускорение потока) при незначительной разнице потери давления на прокачку газа.

Анализ особенностей проявления эффектов, связанных с направлением течения газового потока в шаровом слое с радиальным газораспределением, проводился на экспериментальной установке (раздел 3.2) с использованием методики определения среднеквадратичных значений пульсаций статического давления η и теплообмена с помощью шара-калориметра.

На рисунке 4.5 приведены результаты измерений пульсаций давления η в центре шарового слоя $\bar{r} = 0,5(r_n+r_в)$ в диапазоне чисел $Re_{\bar{r}} = 10^2 \dots 10^3$. Изменение уровня пульсаций давления η носит немонотонный характер и достигает максимальных значений при $Re_{\bar{r}} = 300 \dots 350$, причем при ускоренном течении потока (конфузорный режим) значения η в 2...2,5 раза меньше, чем при замедленном течении (диффузорный режим).

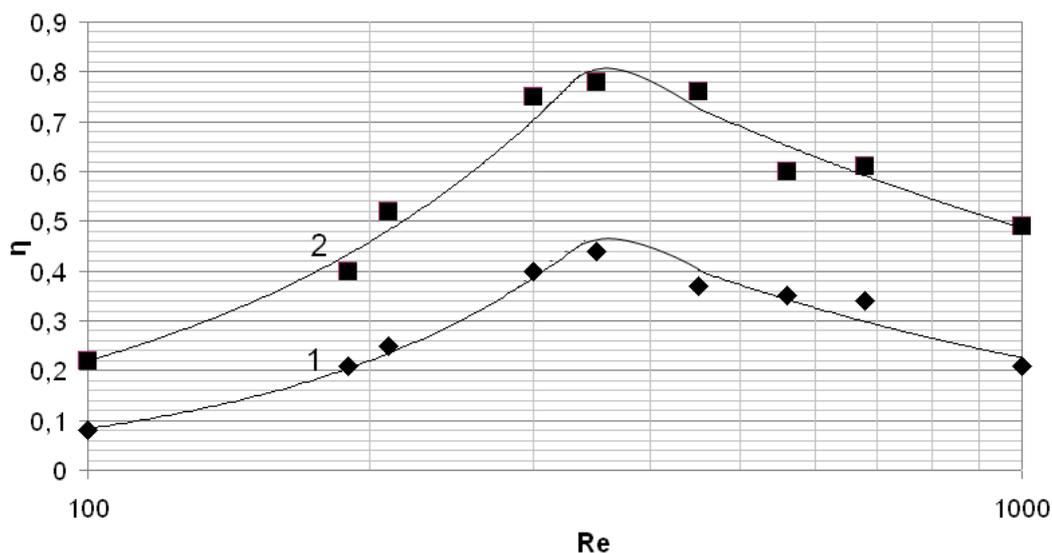


Рисунок 4.5 - Зависимость среднеквадратичных пульсаций статического давления от направления потока в слое с радиальным газораспределением: 1 – ускоренное течение; 2 – замедленное течение

Из графиков видно, что при малых числах $Re_{\bar{r}} \leq 300$ вихреобразование в межшаровой области слоя носит неустойчивый характер, связанный с переходом ламинарной формы течения потока к вихревой и турбулентной форме. Устойчивое

вихреобразование и турбулизация потока проявляется при $Re_{\bar{r}} > 400$, что отчетливо видно также из рисунка 4.5.

Полученные данные можно представить в виде степенной зависимости для соответствующих $Re_{\bar{r}}$ потока:

а) ускоренное течение (конфузорный режим):

$$\eta = 2,3 \cdot 10^{-4} Re_{\bar{r}}^{1,3}; \quad 100 \leq Re_{\bar{r}} \leq 350; \quad (4.9)$$

$$\eta = 9,1 \cdot Re_{\bar{r}}^{-0,52}; \quad 350 < Re_{\bar{r}} \leq 10^3; \quad (4.10)$$

б) замедленное течение (диффузорный режим):

$$\eta = 4,5 \cdot 10^{-4} \cdot Re_{\bar{r}}^{1,3}; \quad 100 \leq Re_{\bar{r}} \leq 350; \quad (4.11)$$

$$\eta = 18,3 \cdot Re_{\bar{r}}^{-0,52}; \quad 350 < Re_{\bar{r}} \leq 10^3. \quad (4.12)$$

Как показали исследования, значения η при замедленном течении всегда выше, чем при ускоренном, причем особенно это проявляется в области малых $Re_{\bar{r}}$. При осевом течении значение параметра η менялось незначительно от скорости течения в разных точках в направлении движения потока.

Исследования теплообмена при ускоренном и замедленном течении потока, результаты которых приведены на рисунке 4.6, подтверждают наличие эффектов реламинаризации и дополнительной турбулизации при радиальном течении газа в шаровой засыпке в зависимости от направления потока: при ускоренном течении значения чисел Нуссельта меньше, чем при замедленном. Различие особенно заметно с ростом Re .

Статистическая обработка результатов измерений позволила представить зависимость характера теплообмена от направления потока в слое в виде:

$$\frac{Nu_{\text{зам}}}{Nu_{\text{уск}}} = 0,57 Re_{\bar{r}}^{0,12}, \quad (4.13)$$

где $Nu_{\text{зам}}$ и $Nu_{\text{уск}}$ – числа Nu для ускоренного (конфузорного) и замедленного (диффузорного) течения потока в слое, соответственно.

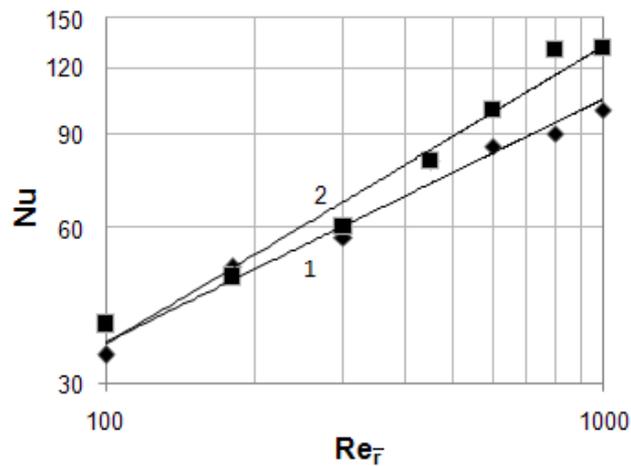


Рисунок 4.6 - Изменение интенсивности теплоотдачи в шаровом слое от числа Re_r в зависимости от направления потока: 1 – ускоренное течение; 2 – замедленное течение

Гидравлическое сопротивление шарового слоя также зависит от направления течения потока, хотя и в меньшей степени, чем при сравнении с осевой схемой течения. На рисунке 4.7 приведены опытные значения гидравлических потерь потока в виде критерия Эйлера $Eu = \Delta p / (\rho U_r^2)$ для соответствующих схем и направлений течения потока газа.

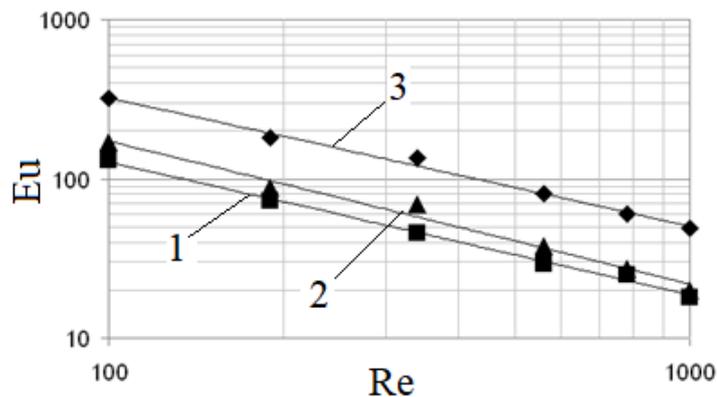


Рисунок 4.7 - Зависимость гидравлического сопротивления шарового слоя в виде критерия Эйлера от направления радиального потока: 1 – ускоренное течение; 2 – замедленное течение; 3 – осевой режим течения в слое

Как и для трубных пучков, помещенных в диффузорно-конфузорные каналы [124–125], гидравлические сопротивления сравнительно мало отличаются при

ускоренном и замедленном радиальном течении, но в 2-3 раза меньше, чем при осевой схеме течения потока.

4.4 Особенности теплообмена труб в шаровом слое насадки при их поперечном обтекании газовым потоком

В различных технологических аппаратах трубные пучки располагаются внутри дисперсной насадки (рисунок 4.8) и служат для подвода или отвода теплоты от газа, протекающего внутри слоя. Подобная схема течения теплоносителей используется как в обычных теплообменных установках, так и в аппаратах с химико-термическими процессами, протекающими с поглощением или выделением теплоты [126–127].

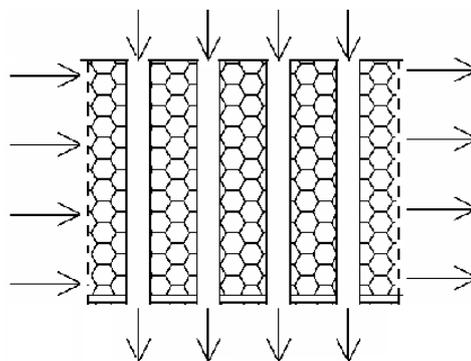


Рисунок 4.8 – Трубный пучок в слое шаровых элементов

Наличие засыпки из элементов шаровой или иной формы способствует интенсивному вихреобразованию в межшаровой области слоя и поэтому служит турбулизатором газовой среды, омывающей поверхности труб, расположенных в слое перпендикулярно потоку газа. Образовавшиеся на шаровой поверхности вихри взаимодействуют с газовым потоком в межшаровой области слоя, увеличивая его турбулизацию, значение которой определяется степенью турбулентности Tu как отношением интенсивности пульсаций скорости потока к ее среднему значению.

Влияние степени турбулентности потока на среднюю величину теплоотдачи трубы рекомендуется учитывать в виде турбулентного числа Рейнольдса $Re \cdot Tu$ [128]:

$$\overline{Nu} = Nu_0 \cdot [1 + 0,09(Re \cdot Tu)^{0,2}] \quad (4.14)$$

где \overline{Nu} и Nu_0 – критерии Нуссельта для трубы, обмываемой потоками газа с искусственной и естественной ($Tu < 1\%$) турбулизацией.

Как следует из формулы (4.14), при увеличении степени турбулентности от 2 до 14% средние значения \overline{Nu} возрастают в 1,2...1,4 раза. Еще большие значения степени турбулентности можно получить, располагая трубу вблизи вентилятора, где уровень $Tu > 20-30\%$, в результате чего средняя теплоотдача увеличивается почти в 2 раза.

Степень турбулизации газового потока в межшаровом пространстве слоя определяется интенсивностью пульсаций скорости $\sqrt{U^2}$ по отношению к среднему значению \bar{U} и непосредственно связано с величиной среднеквадратичных пульсаций статического давления $\sqrt{p^2}$ [129]. В этой связи при анализе влияния шарового слоя в качестве турбулизатора на теплообмен газового потока с трубными пучками использованы опытные данные, полученные при измерении относительной интенсивности пульсаций статического давления.

Исследования по теплообмену трубы в шаровом слое с радиальным течением газа проводились также на экспериментальной установке, описанной в разделе 3.2. Медный цилиндр-калориметр диаметром 15 мм и высотой 50 мм помещался в шаровой слой. Нагрев цилиндра-калориметра осуществлялся от внешнего электронагревателя. Поскольку значений критерия Био для цилиндра составляли $\sim 8 \cdot 10^{-4}$, обработка первичных опытных данных проводилась по формулам (4.4) и (4.6).

Влияние турбулизации потока шаровой засыпкой на теплообмен одиночного цилиндра в слое (рисунок 4.9) очевидно из сравнения с аналогичными опытными значениями критерия Нуссельта при теплообмене в свободном потоке (без насыпного слоя), полученными при одинаковых режимах течения потока в установке.

В отсутствии шаровых элементов, как показали проведенные измерения, интенсивность теплоотдачи цилиндра меняется в соответствии с известной зависимостью:

$$Nu_0 = 0,52 \cdot Re_{tr}^{0,5} \cdot Pr^{0,37}, \quad (4.15)$$

используемой для расчетов теплообмена одиночной трубы с естественной степенью турбулентности потока [130]. Здесь $Re_{тр} = Ud_{тр}/\nu$; $d_{тр}$ – диаметр трубки, м.

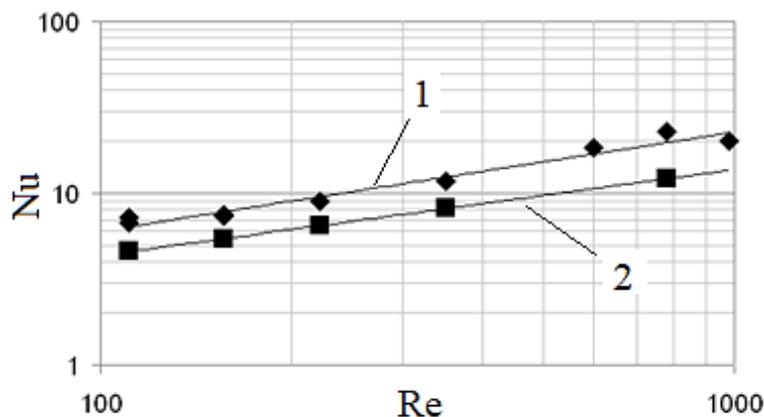


Рисунок 4.9 - Зависимость интенсивности теплоотдачи одиночного цилиндра от Re : 1 – в шаровом слое; 2 – в свободном потоке

Для оценки степени влияния турбулизации потока шаровой насадкой и соответствующего возрастания коэффициента теплоотдачи потока к цилиндру используется зависимость среднеквадратичных пульсаций статического давления η от турбулентного числа Рейнольдса газового потока в слое ($\eta \cdot Re_m$) (рисунок 4.10).

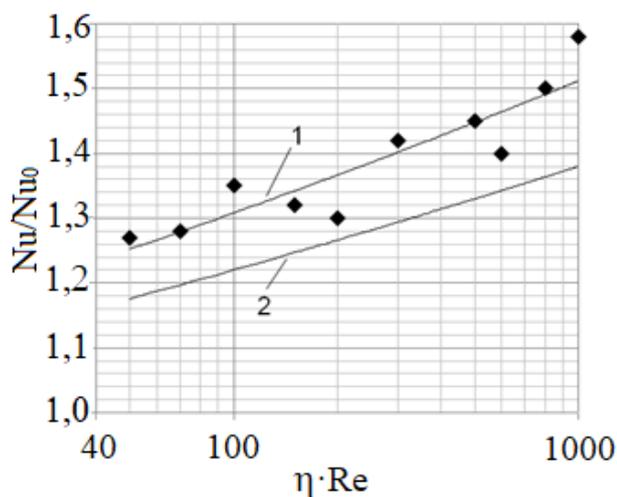


Рисунок 4.10 - Изменение относительной интенсивности теплоотдачи для одиночного цилиндра от турбулентного числа Рейнольдса ($\eta \cdot Re$): 1 – в шаровом слое (без градиента средней скорости); 2 – в свободном потоке с искусственной турбулизацией [128]

Статистическая обработка опытных данных по теплообмену цилиндра в шаровом слое позволила рекомендовать следующие соотношения для практических расчетов коэффициентов теплоотдачи:

а) для ускоренного (конфузорного) радиального течения потока:

$$\begin{aligned} \text{Nu}_{\text{тр}} &= \text{Nu}_0 \cdot [1 + 0,08(\eta \cdot \text{Re}_{\text{тр}})^{0,2}]; \\ \eta &= 2,3 \cdot 10^{-4} \text{Re}_r^{1,3}; \quad 100 \leq \text{Re}_r \leq 350; \\ \eta &= 9,1 \text{Re}_r^{-0,52}; \quad 350 < \text{Re}_r \leq 10^3; \end{aligned} \quad (4.16)$$

б) для замедленного (диффузорного) радиального течения потока:

$$\begin{aligned} \text{Nu}_{\text{тр}} &= \text{Nu}_0 \cdot [1 + 0,09(\eta \cdot \text{Re}_{\text{тр}})^{0,22}]; \\ \eta &= 4,5 \cdot 10^{-4} \text{Re}_r^{1,3}; \quad 100 \leq \text{Re}_r \leq 350; \\ \eta &= 18,3 \text{Re}_r^{-0,52}; \quad 350 < \text{Re}_r \leq 10^3, \end{aligned} \quad (4.17)$$

где Nu_0 вычисляется по формуле (4.15), $\text{Re}_{\text{тр}} = U_r \cdot d_{\text{тр}} / \nu$; $\text{Re}_r = U_r \cdot d_{\text{ш}} / \nu$; U_r – скорость течения потока в слое при $\bar{r} = 0,5(r_{\text{в}} + r_{\text{н}})$, $d_{\text{тр}}$ – диаметр трубки, м.

Погрешность аппроксимации экспериментальных данных с помощью соотношений (4.16) и (4.17) не превышала 18...22% для ускоренного течения и 25% для замедленного течения.

Полученные зависимости можно рекомендовать для расчетов теплообмена трубных пучков, помещенных в шаровой слой при поперечном их расположении относительно направления течения газового потока, поскольку степень турбулизации потока в основном определяется шаровым слоем и в значительно меньшей степени взаимным влиянием труб друг на друга.

4.5 Анализ погрешностей обработки экспериментальных данных

Погрешность косвенных измерений в процессе проведения опытов зависит от функциональной зависимости, используемой для определения искомой величины. Относительная погрешность определяется [130]

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[\frac{\partial \ln f}{\partial x_i} \Delta x_i \right]^2}, \quad (4.18)$$

где $f(x_1 \dots x_n)$ – функциональная зависимость искомой величины.

Для определения среднеквадратичной погрешности коэффициента теплоотдачи (формула 4.18) можно воспользоваться инструментальным значением относительной погрешности отдельных величин:

$$\delta_\alpha = \sqrt{\left(\frac{\Delta d_{\text{ш}}}{d_{\text{ш}}}\right)^2 + 2\left(\frac{\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \tau}{\tau}\right)^2}, \quad (4.19)$$

что в сумме составляет 1,5%.

Аналогично определяется погрешность измерений пульсаций статического давления

$$\delta_p = \sqrt{\left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 + \left(\frac{\Delta r_l}{r_l}\right)^2 + \delta_{\text{н.х.}}^2}, \quad (4.20)$$

где в качестве слагаемых выступают погрешности определения напряжения, чувствительности и нелинейность характеристики датчика давления. Общая погрешность составляет ~1,8%.

Погрешности аппроксимации экспериментальных данных, обработанных по методу наименьших квадратов, определяются суммой квадратов отклонений исходных данных относительно сглаживающей прямой или кривой линии:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n [y_i - f(x_i)]^2. \quad (4.21)$$

Относительная среднеквадратичная погрешность аппроксимации определяется

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{y_i - f(x_i)}{y_i}\right)^2}, \quad (4.22)$$

где y_i – опытное значение величины, $f(x_i)$ – значение сглаживающей функции в точках x_i аргумента.

В большинстве случаев сглаживающую функцию удастся выразить в виде линейной зависимости

$$f(x_i) = ax_i + b \text{ или } f(x_i) = ax_i, \quad (4.23)$$

что упрощает обработку экспериментальных данных.

Численные значения погрешностей аппроксимации данных по теплообмену и пульсациям статического давления приведены в соответствующих разделах диссертации и составляют 8...28% в зависимости от выбора сглаживающей функции и погрешности отдельных измеряемых величин.

4.6 Выводы к разделу 4

1. Выполнено исследование теплоотдачи от шарового элемента к потоку газа в шаровой засыпке. Выявлены факторы, которые отличают теплообмен при осевом и радиальном течении потока в шаровой засыпке. 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 или турбулизации в зависимости от направления течения потока в установке с радиальной схемой течения.

2. Получено эмпирическое соотношение для определения коэффициента теплоотдачи при радиальном течении газа в шаровой засыпке с учетом геометрических и режимных факторов и пористости слоя.

3. Выполнено исследование теплообмена цилиндрического нагревателя, помещенного в шаровую засыпку, с потоком газа при осевом и радиальном течении. Коэффициент теплоотдачи для одиночного цилиндра, помещенного в шаровой слой, значительно выше, чем в свободном газовом потоке, что связано с повышенным уровнем турбулентности потока в межшаровой области слоя.

4. Статистическая обработка опытных данных позволила получить ряд соотношений, позволяющих рассчитывать коэффициенты теплоотдачи от трубного пучка в шаровом слое к газовому потоку при радиальном течении потока в зависимости от конструктивных и режимных параметров энерготехнологических установок.

5 Методика теплогидравлического расчета активной зоны реактора ВТГР в составе энерготехнологического комплекса переработки природного газа

5.1. Использование ВТГР в составе ядерно-технологического комплекса для производства водорода и водородсодержащих газов

Природный газ является универсальным исходным сырьем для производства многочисленных продуктов органического синтеза. Все способы его переработки базируются на каталитических процессах, где в качестве исходного продукта переработки служит синтез-газ (смесь H_2 и CO), который может в дальнейшем использоваться как в металлургии, так и в химическом производстве для получения метанола, диметилового эфира (ДМЭ), этанола и других продуктов синтеза.

Использование синтез-газа в технологии прямого восстановления металлов (в первую очередь железа) из руд позволяет полностью исключить доменный процесс и снизить негативное влияние металлургического производства на окружающую среду. Здесь признанным лидером является компания Midrex, использующая технологию DRI [18, 72, 131–133].

Реакция восстановления железа проходит по схеме



Железо, полученное по данной технологии, содержит 90-94% Fe [72, 133].

Значительный интерес представляют синтетические моторные топлива, которые могут быть получены из природного газа, например ДМЭ и получаемый из него бензин повышенного экологического качества. Главное преимущество ДМЭ как моторного топлива – экологически чистый выхлоп, не содержащий серы и сажи, и практически без оксидов азота [134–136]. Природный газ может быть использован в качестве моторного топлива без переработки с предварительным сжа-

тием или ожижением, однако хранение и транспортировка ДМЭ обходятся значительно дешевле, чем сжиженного или сжатого газа. Первой стадией процесса переработки природного газа в синтетическое топливо является получение синтез-газа.

Синтез-газ можно использовать в качестве основы для энерготехнологической системы дальнейшей передачи теплоты. Передача латентного тепла в виде синтез-газа на дальние расстояния в цикле обратимых термохимических реакций не имеет таких ограничений по расстоянию и потере теплоты, как традиционные способы передачи тепла с горячей водой и паром. Хемотранспорт тепловой энергии происходит следующим образом [137–138]: вблизи энергоисточника – атомной станции дальнего теплоснабжения (АСДТ) проводится химическая реакция с поглощением теплоты. Затем «холодные» продукты реакции транспортируются к потребителю, где в соответствующем химическом реакторе проводится обратная реакция – с выделением теплоты.

Таким образом, синтез-газ имеет широкое энерготехнологическое применение. Один из основных методов его получения – паровая конверсия метана в конверсионной печи при температуре 800–900 °С в присутствии дисперсного катализатора. Дальнейший технологический маршрут синтез-газа зависит от выбора процесса его вторичной переработки. Охлажденная смесь (H_2 и CO) после отделения воды может транспортироваться по трубопроводу потребителям, где в соответствующих химических реакторах осуществляется получение метанола, ДМЭ, этана, моторного топлива и других продуктов, либо использоваться в качестве восстановителя в металлургических процессах, либо при наличии катализатора вступить в обратную реакцию с выделением теплоты, используемой на нужды теплоснабжения.

В качестве энергоисточника для конверсии метана и производства синтез-газа или водорода можно использовать высокотемпературный газоохлаждаемый реактор – ВТГР [6, 140]. Энерготехнологический комплекс состоит из ядерной и технологической части. Для расчета выбрана трёхконтурная тепловая схема, представленная на рисунке 5.1.

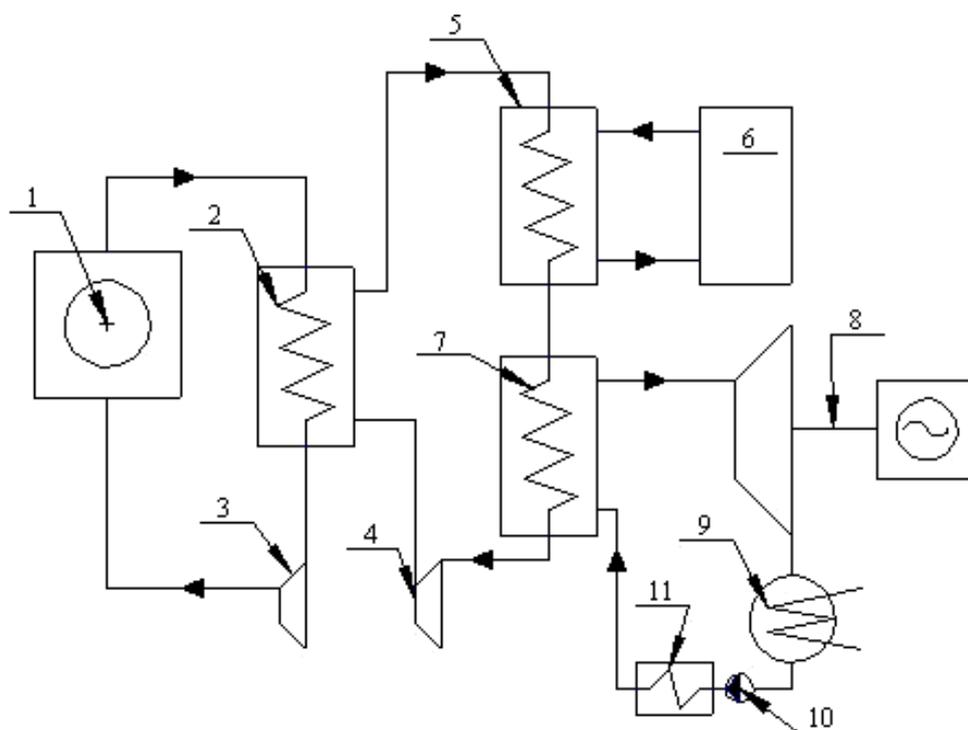


Рисунок 5.1 – Принципиальная схема АСДТ с реактором ВТГР: 1 – реактор; 2 – промежуточный теплообменник; 3 – газодувка первого контура; 4 – газодувка второго контура; 5 – конвертор метана с никелевым катализатором; 6 – система производства синтез-газа; 7 – парогенератор; 8 – турбогенератор; 9 – конденсатор; 10 – насос; 11 – система регенерации тепла

Первый контур состоит из реактора ВТГР и высокотемпературного промежуточного теплообменника (ПТО) с газодувкой первого контура, компоновка двух-петлевая.

Во второй контур входят:

- высокотемпературный промежуточный теплообменник (ПТО);
- парометановый реактор с никелевым катализатором (Р1);
- парогенератор (ПГ);
- газодувка второго контура.

Третий контур (на схеме не показан) включает в себя систему производства водорода и систему получения электрической энергии:

- реактор с железохромовым катализатором (Р2);
- технологические теплообменник и испарители (ТО1, И1, И2);

- смешивающий теплообменник (СТО);
- деаэратор технологический (Д2);
- паровая турбина с необходимым оборудованием;
- насосы, задвижки и другое оборудование.

Второй промежуточный контур вводится для предотвращения попадания водородсодержащих технологических продуктов в систему ядерного реактора. К положительным качествам использования промежуточного контура относятся [10, 141, 142]:

- возможность унификации реакторной установки, т.е. использование одного типа реакторной установки для применения в различных отраслях промышленности;

- меньшая вероятность радиоактивного загрязнения конечного продукта по сравнению со схемой без промежуточного контура;

- возможность территориального разнесения реактора и аппаратов технологического производства, что решает вопросы пожаро- и взрывобезопасности.

Но при этом следует учитывать и отрицательные факторы:

- снижение температурного потенциала тепла, передаваемого в производство, за счет потерь в окружающую среду;

- уменьшение КПД установки;

- повышение капитальных затрат.

В качестве теплоносителя промежуточного контура наиболее предпочтительным является гелий.

Производство водорода паровой конверсией метана проходит в две стадии.

Первая стадия – эндотермическая реакция на никелевом катализаторе:



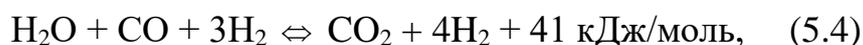
с тепловым эффектом $q_{PI} = 226 \text{ кДж/моль}$ [5].

Состав смеси после реакции соответствует таблице 5.1 [143].

Таблица 5.1 – Равновесный состав конвертированных газов при различных параметрах конверсии и соотношении в смеси CH₄:2H₂O

Параметры конверсии		Объемный состав газа, %					Степень превращения, %	
Температура, °С	Давление, МПа	CO ₂	CO	H ₂	CH ₄	H ₂ O	CH ₄	CO
727	0,098	5,12	14,43	63,42	0,92	16,1	95,8	24,9
727	0,49	5,99	10,14	54,14	6,52	23,19	71,1	26,4
727	0,98	6,2	7,5	47,25	10,51	28,52	56,6	25,7
827	0,098	3,94	16,11	63,76	0,08	16,11	99,59	19,3
827	0,49	4,18	14,93	61,44	1,48	17,96	92,6	20,1
827	0,98	4,51	13,21	57,59	3,8	20,85	82,6	21,0
927	0,098	3,14	16,8	63,12	0,00	16,87	99,9	14,0
927	0,98	3,28	16,24	61,86	0,85	17,76	82,7	22,0

Вторая стадия – экзотермическая реакция на железохромовом катализаторе:



с тепловым эффектом $q_{p2} = 41 \text{ кДж/моль}$.

Изобарные теплоемкости газов, принятые по справочным данным [144], приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Изобарные теплоемкости газов

Обозначение	Величина, кДж/(кг·К)	Обозначение	Величина, кДж/(кг·К)
C_p^{He}	5,193	$C_p^{\text{CO}_2}$	1,206
$C_p^{\text{H}_2}$	14,86	$C_p^{\text{см1}}$	2,84
$C_p^{\text{H}_2\text{O}}$	2,20	$C_p^{\text{см2}}$	3,48
$C_p^{\text{CH}_4}$	4,27	$C_p^{\text{см3}}$	3,31
C_p^{CO}	1,04		

Изобарные теплоемкости смеси газов рассчитаны как средние по массовой доле компонентов в смеси, например:

$$C_p^{см1} = \frac{2 \cdot C_p^{H_2O} \cdot M^{H_2O} + C_p^{CH_4} \cdot M^{CH_4}}{M^{см1}} \quad (5.5)$$

Здесь M_i – молярная масса i -го компонента смеси.

Индекс «см₁» – смесь 1 – относится к смеси метана и водяного пара перед реактором паровой конверсии метана: $CH_4 + 2H_2O$.

Смесь 2 – «см₂» – смесь газов после первой стадии конверсии: $CO + 3H_2$.

Смесь 3 – «см₃» – смесь газов после второй стадии конверсии: $CO_2 + 4H_2$.

5.2 Определение основных теплогидравлических характеристик реактора ВТГР с радиальной раздачей теплоносителя в качестве источника теплоты

Активная зона реактора представляет собой два коаксиальных перфорированных цилиндра, пространство между которыми заполнено шаровыми твэлами. Шаровой твэл реактора состоит из топливного сердечника диаметром 50 мм и многослойного пируглеродного покрытия толщиной 5 мм. Топливный сердечник – это графитовая матрица с диспергированными в ней частичками топлива. Шаровые твэлы образуют в активной зоне реактора свободную засыпку.

Охлаждение реактора осуществляется гелиевым теплоносителем, который движется через активную зону от периферии к центру.

В таблице 5.3 приведены основные характеристики и исходные данные для расчета.

Геометрические размеры активной зоны определяются расходом и степенью нагрева теплоносителя, его гидродинамическими и теплофизическими свойствами.

Объем активной зоны V , м³, определяется по заданной тепловой мощности реактора:

$$V = \frac{Q_{тепл}}{q_v}, \quad (5.6)$$

где $Q_{тепл}$ – тепловая мощность реактора, Вт; q_v – удельная энергонапряженность единицы объема активной зоны, Вт/м³.

Таблица 5.3 – Исходные данные для расчета активной зоны

Параметр	Обозначение	Значение
Тепловая мощность, Вт	$Q_{\text{тепл}}$	$330 \cdot 10^6$
Теплоноситель		Гелий
Замедлитель		Графит
Давление теплоносителя на входе в активную зону, Па	$P_{\text{вх}}$	$5 \cdot 10^6$
Температура теплоносителя, °С		
на входе в активную зону	$T_{\text{вх}}$	500
на выходе из активной зоны	$T_{\text{вых}}$	950
Твэлы		шаровые
Диаметр шарового твэла, м	$d_{\text{ш}}$	0,06
Диаметр топливного сердечника, м	d_c	0,05
Удельная энергонапряженность активной зоны, Вт/м ³	q_v	$9,5 \cdot 10^6$

Объем кольцевой активной зоны определяется ее наружным и внутренним радиусами и высотой:

$$V = \pi(r_n^2 - r_g^2)H, \quad (5.7)$$

где r_n и r_g – наружный и внутренний радиусы активной зоны, соответственно; H – высота активной зоны.

Число шаровых твэлов в активной зоне определяется из соотношения

$$\frac{\pi d_{\text{ш}}^3}{6} n = V \cdot (1 - \varepsilon), \quad n = \frac{6}{\pi} \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \frac{V}{d_{\text{ш}}^3} \quad (5.8)$$

где $d_{\text{ш}}$ – диаметр шарового твэла, м; ε – пористость шаровой засыпки. При свободной шаровой засыпке пористость лежит в диапазоне 0,38–0,4, в данном расчете принята 0,39 [23, 141].

Расход теплоносителя G , кг/с, определяется формулой

$$G = \frac{Q_{\text{менл}}}{c_p \Delta T}, \quad (5.9)$$

где $\Delta T = T_{\text{вых}} - T_{\text{вх}}$ – перепад температур теплоносителя на выходе и на входе, К; c_p – теплоемкость теплоносителя, Дж/(кг·К). Для гелия в рассматриваемом диапазоне температур и давлений теплоемкость практически постоянна и равна 5193 Дж/(кг·К).

Для определения геометрических размеров – внутреннего, наружного радиусов и высоты – зададимся внутренним радиусом, а остальные характеристики определим исходя из теплогидравлических параметров активной зоны.

Число Нуссельта Nu_ε для внутреннего радиуса засыпки определяется по формуле [72]:

$$Nu_\varepsilon = \frac{4\lambda_{ш}}{\lambda_{г,в} \left[\frac{24(1-\varepsilon)\lambda_{ш}}{q_V d_{ш}^2} \Delta T_{ц-г,в} - 1 \right]} \quad (5.10)$$

где $\lambda_{ш}$ – коэффициент теплопроводности шарового твэла, Вт/(м·К); $\lambda_{г,в}$ – коэффициент теплопроводности газа для температуры на выходе из активной зоны, Вт/(м·К); $\Delta T_{ц-г,в}$ – разность температур в центре твэла и газа на выходе из активной зоны, К. Температура в центре твэла принята равной 1523 К [144], исходя из температурных ограничений материалов активной зоны.

Число Рейнольдса Re_ε для внутреннего радиуса засыпки определяется из формулы:

$$Nu_\varepsilon = 0,36 \frac{(1-\varepsilon)^{0,33}}{\varepsilon} \chi_\varepsilon^{-1,6} Re_\varepsilon^{0,62} \quad (5.11)$$

где χ – геометрический параметр, определяемый соотношением

$$\chi = 4 \left(\frac{r_\varepsilon}{r_H} + \frac{r_H}{r_\varepsilon} + 2 \right)^{-1},$$

для $r = r_\varepsilon \chi_\varepsilon = 1$.

Следовательно, число Рейнольдса можно определить как

$$Re_{\epsilon} = \left\{ \left[0,36 \frac{(1-\epsilon)^{0,33}}{\epsilon} \right]^{-1} Nu_{\epsilon} \right\}^{0,62} \quad (5.12)$$

Из определения энергонапряженности [141, 144–145]:

$$q_v = \frac{Q_{менл}}{V} = \frac{c_p \cdot \Delta T \cdot G}{H \cdot \pi \cdot (r_n^2 - r_{\epsilon}^2)} \quad (5.13)$$

можно выразить следующее соотношение внутреннего и наружного радиусов:

$$r_{\epsilon}^2 \cdot \left(\frac{r_n^2}{r_{\epsilon}^2} - 1 \right) = \frac{c_p \cdot \Delta T \cdot G}{H \cdot \pi \cdot q_v} \quad (5.14)$$

Зная число Рейнольдса для внутреннего радиуса, можно выразить r_{ϵ} из формулы:

$$Re_{\epsilon} = \frac{w \cdot d_{ш}}{\nu} = \frac{G \cdot d_{ш}}{H \cdot 2\pi \cdot r_{\epsilon} \cdot \mu_d} \quad (5.15)$$

где w – скорость газа на выходе из активной зоны, м/с; μ_{ϵ} – динамическая вязкость для температуры на выходе из активной зоны, Па·с.

Из формулы (5.15) получаем соотношение внутреннего радиуса и высоты активной зоны:

$$r_{\epsilon} = 6,63 / H \quad (5.16)$$

откуда, задаваясь значением внутреннего радиуса, можно вычислить высоту, и затем, из формулы (5.14), значение наружного радиуса.

В таблице 5.4 представлены результаты расчета геометрических и теплогидравлических характеристик активной зоны.

В таблице 5.5 приведены принимаемые значения r_{ϵ} и соответствующие значения H и r_n , а также значения чисел Нуссельта и Рейнольдса на выходе из активной зоны, рассчитанные по формулам (5.10) и (5.15).

Справочные данные для расчета приведены в таблице 5.6.

Таблица 5.4 – Геометрические и теплогидравлические характеристики активной зоны

Параметр	Формула	Значение
Объем активной зоны V , м ³	5.7	34,7
Число шаровых ТВЭЛОВ n , штук	5.8	187 356
Расход теплоносителя G , кг/с	5.9	141,2
Число Нуссельта для внутреннего радиуса Nu_e	5.11	130,7
Число Рейнольдса для внутреннего радиуса Re_e	5.12	3834

Таблица 5.5 – Радиусы и высота активной зоны

r_e , м	r_n , м	H , м	Re_n	Nu_n	T_u , °C	ξ_r	Δp
0,65	1,227	10,209	2833	127	698,5	6,409	130,2
0,70	1,287	9,479	2909	127	698,7	6,373	135,3
0,75	1,340	8,847	2979	128	698,9	6,340	139,9
0,80	1,400	8,295	3046	128	699,2	6,308	144,4
0,85	1,462	7,807	3108	129	699,5	6,279	148,5
0,90	1,519	7,373	3167	129	699,8	6,250	152,5
0,95	1,576	6,985	3223	130	700,0	6,224	156,2
1,0	1,632	6,636	3275	130	700,3	6,200	159,7
1,05	1,688	6,320	3325	131	700,5	6,176	163,02
1,10	1,744	6,032	3372	131	700,8	6,154	166,2
1,15	1,799	5,770	3417	132	701,0	6,133	169,2
1,20	1,854	5,530	3460	132	701,3	6,113	172,1
1,25	1,909	5,308	3501	133	701,5	6,093	174,8
1,30	1,963	5,104	3540	133	701,8	6,075	177,4

Таблица 5.6 – Справочные данные для расчета

Параметр	Значение
Теплоемкость гелия, Дж/(кг·К)	5193
Коэффициент теплопроводности гелия, Вт/(м·К)	
$T = 950^{\circ}\text{C}$	0,4253
$T = 500^{\circ}\text{C}$	0,3025
Коэффициент теплопроводности шара, Вт/(м·К)	18
Динамическая вязкость гелия, Па·с	
$T = 950^{\circ}\text{C}$	$5,295 \cdot 10^{-5}$
$T = 500^{\circ}\text{C}$	$3,823 \cdot 10^{-5}$

При расчетах гидравлического сопротивления активной зоны нужно учитывать особенности радиального течения газа, связанные с изменением скорости потока от входа раздаточного коллектора к выходу приемного коллектора. С учетом коэффициента гидравлического сопротивления ξ_r , отнесенного к среднему значению радиуса активной зоны, потери давления в шаровом слое Δp , Па, можно считать, как:

$$\Delta p = \xi_r \cdot (8\pi^2 d_w)^{-1} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \cdot \left(\frac{G_m}{H\rho_z} \right)^2 \quad (5.17)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления определялся по формуле:

$$\xi_r = \frac{108}{\varepsilon^4} \cdot \text{Re}_r^{-0,79} \cdot \chi \quad (5.18)$$

Расчетные значения ξ_r и Δp приведены в таблице 5.5.

На рисунке 5.2 приведены расчетные значения параметров активной зоны, полученные по описанной выше методике. Представлены зависимости наружного радиуса и высоты активной зоны от выбранного значения внутреннего радиуса, а также зависимости падения давления и коэффициента гидравлического сопротивления от внутреннего радиуса.

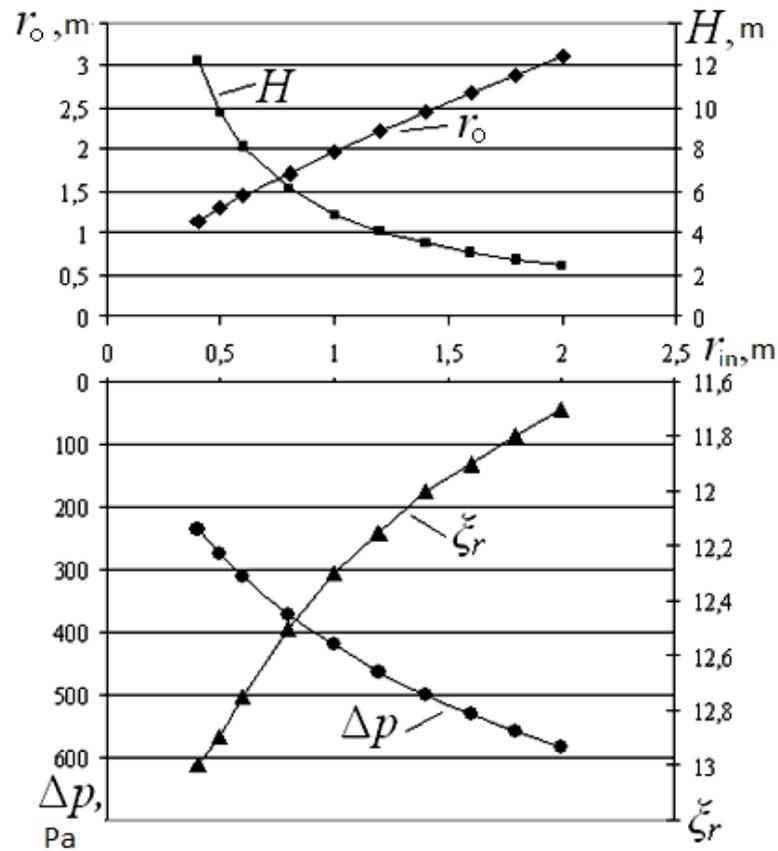


Рисунок 5.2 – Расчетные значения параметров активной зоны

5.3 Определение гидравлического сопротивления первого контура энерготехнологической установки с реактором ВТГР с радиальным течением теплоносителя

Известные параметры активной зоны реактора ВТГР позволяют определить параметры первого контура энерготехнологической системы, представленного на рисунке 5.2. Первый контур предусматривает две циркуляционные петли для повышения безопасности и надежности проекта. В первый контур энерготехнологической системы входят реактор ВТГР, высокотемпературный промежуточный теплообменник ПТО и газодувка первого контура Г1 [146].

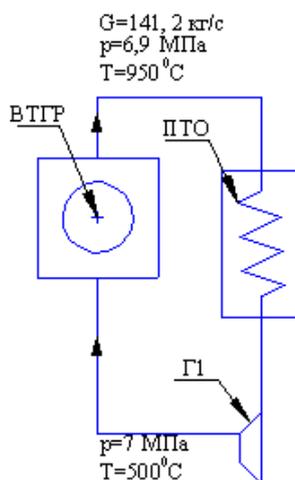


Рисунок 5.2 – Первый контур энерготехнологической ядерной системы на основе ВТГР для получения синтез-газа

В таблице 5.7 приведены исходные данные для расчета первого контура.

Таблица 5.7 – Данные для расчета первого контура

Параметр	Обозначение	Значение	Размерность
Тепловая мощность реактора	$Q_{\text{тепл}}$	330	МВт
Давление гелия перед реактором	p_P^{He}	$7 \cdot 10^3$	кПа
Средний перепад давления в активной зоне	$\Delta p_{\text{аз}}$	60	кПа
Перепад давления в промежуточном теплообменнике, принят	$\Delta p_{\text{ПТО}}$	35	кПа
Общий перепад давления для первого контура, принят	$\Delta p_{\text{Г1}}$	100	кПа
Температура гелия на входе в реактор	t_P^{He}	500	°C
Температура гелия на выходе из реактора	t''_P^{He}	950	°C
Расход гелия первого контура	$G_{\text{Г1}}^{\text{He}}$	141,2	кг/с

Температура перед газодувкой (Г1) определяется по формуле [10, 141]:

$$T_{\Gamma 1}^{\text{He}} = T_P^{\text{He}} \cdot \left(1 + \frac{\pi_1^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{\Gamma 1}} \right) = (500 + 273) \cdot \left(1 + \frac{1,014^{\frac{1,67-1}{1,67}} - 1}{0,7} \right) = 494^\circ\text{C}, \quad (5.19)$$

где

$$\pi_I = \frac{p_P^{\text{He}}}{p_P^{\text{He}} - \Delta p_I} = \frac{7 \cdot 10^6}{7 \cdot 10^6 - 0,1 \cdot 10^6} = 1,014$$

– степень повышения давления в газодувке $\Gamma 1$; $k = 1,67$ – показатель адиабаты для гелия [144]; $\eta_{\Gamma 1} = 0,7$ – изэнтропийный КПД газодувки.

Тогда мощность газодувки равна [141]:

$$Q_{\Gamma 1} = \frac{G_I^{\text{He}} \cdot C_P^{\text{He}} (T_P^{\text{He}} - T_{\Gamma 1}^{\text{He}})}{\eta_{\Gamma 1} \cdot \eta_M} = \frac{141,2 \cdot 5193 \cdot (773 - 767)}{0,7 \cdot 0,9} = 7,38 \cdot 10^6 \text{ Вт}, \quad (5.20)$$

где $\eta_M = 0,9$ – КПД привода газодувки (принят).

На основании существующего опыта эксплуатации высокотемпературных газовых теплообменников [10] температуру входа и выхода гелия второго контура для ПТО принимаем соответственно $t_{\text{ПТО}}^{\text{He}} = 450^\circ\text{C}$ и $t_{\text{ПТО}}^{\text{He}} = 900^\circ\text{C}$.

Мощность, передаваемая ПТО во второй контур равна:

$$Q_{\text{ПТО}} = Q_{\text{тепл}} \cdot \eta_{\text{ПТО}} = 330 \cdot 0,96 = 316,8 \text{ МВт}, \quad (5.21)$$

где $\eta_{\text{ПТО}} = 0,96$ – КПД промежуточного теплообменника (принят).

Первый контур предусматривает две циркуляционные петли для повышения безопасности и надежности проекта.

Тогда ориентировочные габаритные размеры двух ПТО будут [10]: диаметр 4,5 м; высота 20 м.

Для сравнения приведены также параметры первого контура для ВТГР с осевым течением теплоносителя, имеющей те же размеры, что и активная зона с радиальной раздачей теплоносителя (рисунок 5.3).

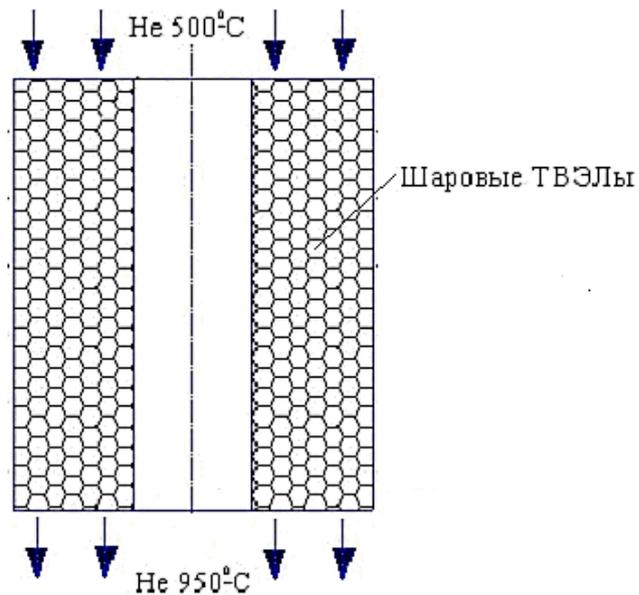


Рисунок 5.3 – Кольцевая активная зона с осевым течением теплоносителя

Расчет ведется по методике, предложенной в [141, 144]:

$$\Delta p = \xi_{ш} \frac{H}{d_{эк}} \cdot \frac{U^2}{2\rho}, \quad (5.22)$$

где $d_{эк}$ – эквивалентный диаметр активной зоны, вычисляемый по формуле

$$d_{эк} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \cdot D. \quad (5.23)$$

Гидравлическое сопротивление $\xi_{ш}$ при больших значениях $Re > 10^4$ определяется пористостью засыпки:

$$\xi_{ш} = \frac{0,54}{\varepsilon^4}. \quad (5.24)$$

Результаты расчета первого контура с ВТГР и промежуточного теплообменника приведены в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Результаты расчета первого контура

Параметр	Радиальная схема	Осевая 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 контур, МВт	316,8	316,8

Из таблицы 5.8 видно, что использование осевой схемы течения позволяет сэкономить 16% мощности, потребляемой газодувкой.

5.4 Оценка параметров установки переработки природного газа с радиальным течением потоков в дисперсном слое

Получение синтез-газа паровой конверсией метана представляет собой эндотермическую реакцию на никелевом катализаторе с тепловым эффектом 206 кДж/моль, или 12 908 кДж/кг исходного метана [5].

Для проведения расчета использовались следующие исходные данные:

- расход метана 300...1500 м³/ч;
- температуры реакционной смеси на входе и выходе из реактора 500/800°С;
- давление реакционной смеси 2,0 МПа;
- диаметр труб и шаг их установки $d = 0,04$ м, $s = 0,056$ м;
- степень превращения парометановой смеси 0,95;
- температура гелия на входе в метановый реактор 850°С.

В случае выбора радиальной схемы течения реакционная смесь движется через слой катализатора, заполняющего все межтрубное пространство реактора. Нагрев смеси (СН₄ + Н₂О) осуществляется системой вертикально расположенных

трубных пучков с гелиевым теплоносителем. На рисунке 5.3 приведен общий вид четырехходового конвертера метана с радиальным течением реакционной смеси ($\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$). В первой и третьей секциях конвертера по ходу реакционной смеси реализуется диффузорный режим течения, во второй и четвертой – конфузورный режим.

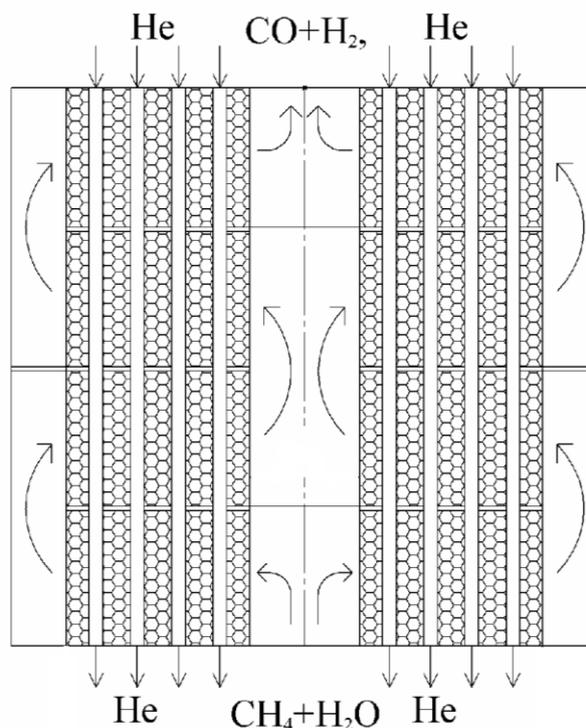


Рисунок 5.3 – Схема конвертера метана

При расчете реактора конверсии приняты следующие допущения [147]:

- процесс конверсии метана начинается при температуре 700°C , до этой температуры скорость реакции низкая;

- реакция протекает полностью – это допущение ведет к увеличению расхода тепловой энергии на реакцию, то есть расчет выполняется с запасом по производительности; тогда расход парометановой смеси на входе равен расходу смеси газов на выходе

$$\text{на выходе } G_{P1}^{cM1} = G_{P1}^{cM2} ;$$

- в расчете не учитывается изменение изобарных теплоемкостей компонентов при изменении температуры, так как в принятом диапазоне температур и для данных смесей это изменение мало;

- реакция протекает по линейному закону.

В аппарате происходит два процесса:

- нагрев парометановой смеси от 500 до 800 °С;
- реакция конверсии метана.

Исходные данные для расчета приведены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Исходные данные для расчета конвертора метана

Величина	Обозначение	Значение	Размерность
Температура смеси на входе в реактор, принята	$t'_{P1}{}^{cm1}$	500	°С
Температура газовой смеси после реактора	$t''_{P1}{}^{cm2}$	800	°С
Расход гелия через реактор, вычислен	G_{P1}^{He}	135,6	кг/с
Количество теплоты на реакцию	q_{pl}	12,8·106	Дж/м ³ (CH ₄)
Плотность парометановой смеси	ρ_{cm1}	12,56	кг/м ³

Уравнение теплового баланса:

$$Q_{P1} = Q_H + Q_P, \quad (5.25)$$

где:

$$Q_{P1} = G_{P1}^{He} \cdot C_p^{He} \cdot (t'_{P1}{}^{He} - t''_{P1}{}^{He}) \quad (5.26)$$

– теплота, передаваемая гелием второго контура к химическому реактору;

$$Q_H = G_{P1}{}^{cm1} \cdot C_p{}^{cm1} \cdot (t''_{P1}{}^{cm1} - t'_{P1}{}^{cm1}) \quad (5.27)$$

– теплота, затрачиваемая на нагрев смеси газов;

$$Q_P = G_{P1}{}^{cm1} \cdot q_{pl} / \rho_{cm1} \quad (5.28)$$

– теплота, затрачиваемая на химическую реакцию.

Из уравнения теплового баланса определяется расход парометановой смеси:

$$G_{P1}{}^{cm1} = 31,16 \text{ кг/с.}$$

Расходы пара и метана в исходной смеси определяются по мольному соотношению компонентов смеси.

Площадь теплопередающей поверхности F и число трубок n для каждой зоны определяем по соотношениям:

$$Q_P = K_P \cdot F_P \cdot \Delta t_P \cdot \psi, \quad (5.29)$$

$$Q_H = K_H \cdot F_H \cdot \Delta t_H \cdot \psi, \quad (5.30)$$

где K – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); Δt – среднелогарифмический температурный напор, К; ψ – коэффициент, учитывающий направление движения гелия и конвертируемого газа, согласно [76], для принятой схемы $\psi = 0,93$.

Так как определение коэффициента теплопередачи от гелия в трубах к газу, текущему в шаровой засыпке, требует отдельного исследования, в настоящем расчете принят вероятный диапазон значений K (см. таблицу 5.10).

Диаметр и длина трубки выбираются по технологическим соображениям [148]: $d_{тр} = 0,04$ м и $L = 7$ м.

Расчетные значения числа трубок приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Результаты расчета конвертера метана

Коэффициент тепло-передачи K , Вт/(м ² ·К)	Площадь тепло-передающей поверхности, м ²		Число трубок		Число трубок в одном модуле		Диаметр, м		Объем межтрубного пространства, м ³
	зоны нагрева	зоны реакции	зоны нагрева	зоны реакции	зоны нагрева	зоны реакции	зоны нагрева	зоны реакции	
20	7490,2	32167,0	8515	36568	852	3657	1,86	4,464	69,69
30	4993,5	21444,7	5677	24379	568	2438	1,51	3,599	44,54
40	3745,1	16083,5	4258	18284	426	1829	1,30	3,091	32,48
50	2996,1	12866,8	3406	14627	340	1463	1,17	2,748	25,43
60	2496,7	10722,3	2838	12189	284	1219	1,07	2,497	20,85
70	2140,1	9190,5	2433	10448	243	1045	0,990	2,304	17,63
80	1872,5	8041,8	2129	9142	213	914	0,928	2,149	15,26
90	1664,5	7148,2	1892	8126	189	813	0,877	2,022	13,44
100	1498,0	6433,4	1703	7314	170	731	0,835	1,914	11,99

Далее определим габаритные размеры конвертора.

Конвертор состоит из 10 модулей.

Трубки расположены по концентрическим окружностям с шагом $s = 1,4$
 $d_{\text{тр}} = 0,056$ м.

Внутренний диаметр корпуса определяется по формуле [148]:

$$D = D' + 2d_{\text{тр}}, \quad (5.31)$$

где D' зависит от числа трубок n и определяется из таблицы 5.11 [148].

Таблица 5.11 – К выбору диаметра корпуса аппарата

D'/s	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
n	7	19	37	62	93	130	173	223	279	341
D'/s	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40
n	439	517	613	721	823	931	1045	1165	1306	1459

Принимая, что в области входа газа можно разместить 7 трубок, вычислим отдельно диаметр зоны нагрева D_H и зоны реакции D_P . Внутренний диаметр кожуха равен диаметру зоны реакции.

Объем межтрубного пространства вычисляется как

$$V = \frac{\pi L}{4} (D_P - D_0 - d_{mp} \cdot n_H - d_{mp} \cdot n_P), \quad (5.32)$$

Результаты расчета приведены в таблице 5.10.

Теперь нужно оценить необходимый объем никелевого катализатора.

Константу скорости реакции найдем по следующей формуле [5]:

$$K_1 = K_0 \cdot e^{\frac{-E}{R \cdot T_{P1}}} = 67,5 \cdot e^{\frac{-62430}{8,31 \cdot 1073}} = 0,061 \frac{\text{м}^3}{\text{с} \cdot \text{м}^2}, \quad (5.33)$$

где $T_{P1} = 1073$ К – средняя температура реакции; $E = 62\,430$ – энергия реакции; $R = 8,31$ Дж/(К·моль) – универсальная газовая постоянная; $K_0 = 67,5$.

Необходимый объем катализатора равен [149]:

$$V_K = -\frac{G_{P1}^{cm1}}{\rho_{cm1}} \cdot \frac{\ln(1-\alpha)}{K_1 \cdot S} = -\frac{31,16}{12,56} \cdot \frac{\ln(1-0,97)}{0,061 \cdot 258} = 0,553 \text{ м}^3, \quad (5.34)$$

где $\alpha = 0,97$ – степень превращения метана; $S = 258$ м²/м³ – удельная поверхность катализатора.

Объем катализатора гораздо меньше объема межтрубного пространства, следовательно, в реакторе можно разместить достаточное количество катализатора.

Результаты расчета приведены в таблице 5.12 и в виде номограммы, состоящей из четырех квадрантов (рисунок 5.4).

Таблица 5.12 – Результаты теплогидравлического расчета конвертора метана

Параметр	Расход метана, м ³ /ч		
	500	1000	1500
Количество теплоты, МВт	6,85	13,71	20,56
в том числе: на нагрев смеси газов	0,93	1,87	2,80
на реакцию	5,92	11,84	17,76
Расход гелия, кг/с	17,6	35,2	52,8
Параметры теплообменных труб			
длина, мм	3000		
диаметр x толщина стенки, мм	40 x 2,5		
шаг, мм	56		
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² ·К)			
в зоне нагрева	120,6	133,8	143,4
в зоне реакции	155,5	168,8	178,4
Площадь поверхности теплообмена, м ²	231,9	425,5	601,9
Диаметр конвертора, м	1,62	2,10	2,45
Перепад давления по конвертируемому газу, кПа	3,79	12,5	24,6
Перепад давления по гелию, кПа	3,17	3,71	4,14
Необходимый объем катализатора, м ³	0,24	0,48	0,72
Объем межтрубного пространства, м ³	3,2	5,5	7,5

Как показывают расчеты конвертора с радиальным течением конвертируемого газа, при расходе метана 1000 м³/ч его диаметр составляет до 2,45 м при заданной

длине труб с высокотемпературным потоком гелия от ВТГР 3 м. Гидравлическое сопротивление засыпки составляет до 24,6 кПа в зависимости от расхода метана.

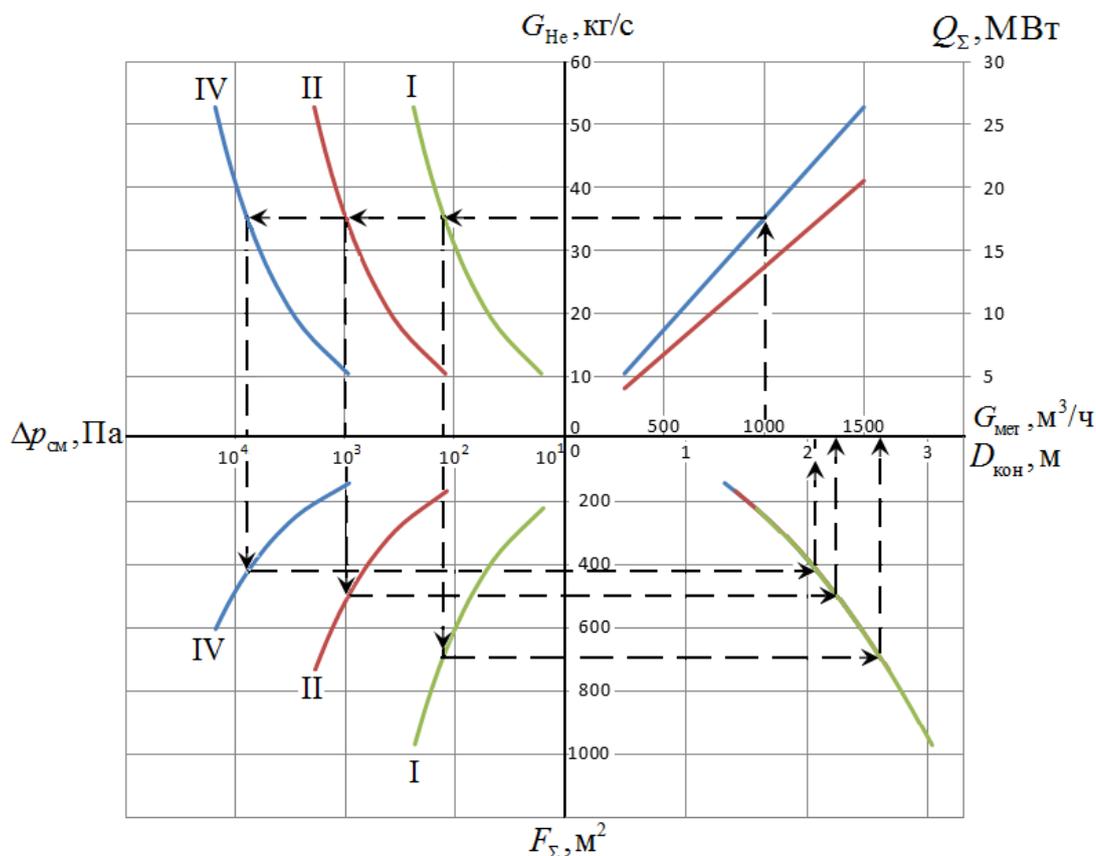


Рисунок 5.4 – Номограмма для определения параметров конвертера метана с радиальным течением реакционной смеси

При заданном расходе метана G_M в первом квадранте легко определяется требуемое количество гелия G_{He} с температурой 850 °С, гидравлическое сопротивление парометановой смеси Δp , необходимая площадь трубных пучков F_{Tr} при длине труб 3,0 м и диаметр конвертера D , зависящие от выбранного числа ходов.

Таким образом, при конверсии метана в количестве 1000 м³/ч площадь поверхности трубных пучков с потоком гелия 35 кг/с составляет 190...600 м², диаметр конвертера находится в пределах 1,3...2,5 м, гидравлические потери реакционной парометановой смеси 10²...8·10³ Па в зависимости от выбранного числа ходов.

5.5 Принципиальная схема энерготехнологической системы на основе получения синтез-газа

Для производства электроэнергии исходя из соображения повышения экономичности цикла (температура острого пара 565°C , давление $12,8\text{ МПа}$) выбран турбоагрегат Т-100-130 ТМЗ. Температура питательной воды перед парогенератором 232°C . Режим работы турбоустановки – конденсационный, установленная электрическая мощность $N_{\text{ТА}} = 100\text{ МВт}$.

Для выработки такой электрической мощности согласно [10, 141] требуется тепловой мощности:

$$Q_{\text{ТА}} = 15,7 + 1,968 \cdot N_{\text{ТА}} + 0,258 \cdot (N_{\text{ТА}} - 98) = 213,0\text{ Гкал/ч} = 247,62\text{ МВт}. \quad (5.35)$$

Тогда расход пара на турбину равен:

$$D_0 = \frac{Q_{\text{ТА}}}{i_{\text{ПГ}}^{\text{H}_2\text{O}} - i_{\text{ПГ}}^{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{247,62 \cdot 10^3}{3512,5 - 1001,7} = 98,67\text{ кг/с} \quad (5.36)$$

где $i_{\text{ПГ}}^{\text{H}_2\text{O}} = 3512,5\text{ кДж/кг}$ $i_{\text{ПГ}}^{\text{H}_2\text{O}} = 1001,7\text{ кДж/кг}$ – энтальпия пара и воды на выходе и на входе в парогенератор, соответственно [150].

Расход циркуляционной воды $Q_{\text{Ц}} = 16\ 000\text{ м}^3/\text{ч}$, температура 20°C .

Расход конденсата $G_{\text{К}} = 81,4\text{ кг/с}$.

Температуру гелия на входе в парогенератор находим по формуле:

$$t_{\text{ПГ}}^{\text{He}} = t_{\text{ПГ}}^{\text{He}} + \frac{Q_{\text{ТА}}}{G_{\text{II}}^{\text{He}} \cdot C_p^{\text{He}} \cdot \eta_{\text{ПГ}}} = 441,5 + \frac{247,62 \cdot 10^6}{135,6 \cdot 5193 \cdot 0,92} = 823,8^{\circ}\text{C} \quad (5.37)$$

где $t_{\text{ПГ}}^{\text{He}} = t_{\text{Г2}}^{\text{He}}$ – температура на выходе из ПГ; $\eta_{\text{ПГ}} = 0,92$ – КПД парогенератора (принят).

Тогда тепловая мощность, передаваемая химическим реактором Р1 рабочему телу, равна:

$$Q_{\text{P1}} = \frac{G_{\text{II}}^{\text{He}} \cdot C_p^{\text{He}} (t_{\text{P1}}^{\text{He}} - t_{\text{P1}}^{\text{He}})}{\eta_{\text{P1}}} = \frac{135,6 \cdot 5193 \cdot (900 - 823,8)}{0,92} = 58,3\text{ МВт}, \quad (5.38)$$

где $\eta_{\text{P1}} = 0,92$ – КПД теплопередачи химического реактора.

5.6 Выводы к разделу 5

1. Предложена энерготехнологическая система производства синтез-газа с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором, конвертором метана и устройством для регенерации тепла, использующими радиальную схему течения теплоносителей в зернистом слое, предназначенная для дальнейшей передачи теплоты и снабжения водородсодержащим сырьем металлургических и химических производств.

2. Разработана методика теплогидравлического расчета установки производства тепловой энергии с реактором ВТГР, использующей радиальную схему течения гелиевого теплоносителя в слое шаровых тепловыделяющих элементов.

3. Приведены расчетные данные, показывающие преимущества аппаратов, работающих по радиальной схеме. Показано, что ВТГР с радиальной раздачей теплоносителя имеет более компактную конструкцию и значительно меньшее гидравлическое сопротивление вследствие меньших скоростей потока в межшаровой области твэлов. Радиальная схема течения газов, используемая в аппарате конверсии метана с гелиевым обогревом, позволяет реализовать более компактную конструкцию по сравнению с аналогичными устройствами с осевой схемой течения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в диссертационной работе:

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

2. Установлено существенное отличие основных теплогидравлических параметров при радиальном течении газового потока в дисперсном шаровом слое по сравнению с осевой схемой течения.. При незначительной кривизне поверхности наружного и внутреннего (раздающего и приемного) коллекторов $gn/rv \leq 1,25$ характеристики потока газа в слое для радиальной и осевой схемы течения практически совпадают.

3. Радиальная схема течения газового потока в слое характеризуется снижением гидравлического сопротивления в 2-3 раза по сравнению с осевой схемой течения как при ускоренном (конфузормом), так и при замедленном (диффузормом) течении потока

4. Результаты моделирования течения газа в межшаровой области слоя показали, 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 относительно температуры потока.

5. Возникновение эффекта реламинаризации связано с ускорением газового потока в шаровом слое и сопровождается уменьшением относительной интенсивности пульсаций статического давления. Генерация крупномасштабных вихревых структур и частота их образования характеризуется числом Струхала, 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 (7), характеризующее изменение интенсивности теплообмена слоя с потоком газа в радиальном направлении течения. Помимо пористости слоя ϵ и местного числа Рейнольдса $Re_{\text{л}}$ основным параметром для расчета критерия Нуссельта служит параметр $\chi_{\text{г}}$, учитывающий относительную кривизну поверхности коллекторов и влияние ускорения потока газа.

7. 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. Расчет активной зоны ядерного реактора (ВТГР), проведенный на основе полученных результатов исследований показал, что основным достоинством схемы с радиальным течением теплоносителей проявляется в реализации более компактной конструкции с меньшим гидравлическим сопротивлением по сравнению с осевой схемой течения потока в слое тепловыделяющих элементов.

9. Экспериментальные данные по теплообмену цилиндрических элементов, помещенного в шаровой слой, позволяют рассчитать конструктивные и режимные параметры установок с трубными пучками. 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.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

BISO – bistructural isotopic (изотопное с двойной структурой)

DNS – Direct numerical simulation (прямое численное моделирование)

HTGR – High Temperature Gas-cooled Reactor

IS – iodine-sulphur, йодно-серный процесс термохимического разложения
ВОДЫ

LES – Large eddy simulation (моделирования крупных вихрей)

RANS – Reynolds-averaged numerical simulation (моделирование на основе
усреднения по Рейнольдсу)

TRISO – tristructural isotopic (изотопное с тройной структурой)

VHTR – Very High Temperature Reactor

АЭС – атомная электрическая станция

ВТГР – высокотемпературный газоохлаждаемый реактор

ГТУ – газотурбинная установка

ДМЭ – диметиловый эфир

КВД – компрессор высокого давления

КГС – коэффициент гидравлического сопротивления

КНД – компрессор низкого давления

КПД – коэффициент полезного действия

МОКС – смешанное оксидное топливо

ПНЖБ – предварительно напряженный железобетон

ПО – промежуточный охладитель

ПТО – теплообменник

ТВС – тепловыделяющая сборка

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент

ЯЭС – ядерно-энергетическая система

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Handbook of Generation IV Nuclear Reactors : сборник статей. – Амстердам: Woodhead Publishing, 2016. – 940 с. – ISBN: 9780081001622.
2. Пономарев-Степной Н. Н. Атомно-водородная энергетика / Н. Н. Пономарев-Степной // Вестник Российской академии наук. – 2021. – Т. 91. – № 5. – С. 484-498.
3. Елагин Ю. П. Исследования реакторных систем поколения IV / Ю. П. Елагин // Атомная техника за рубежом. – 2007. – № 11. – С. 7-18.
4. Столяревский А. Я. Ядерно-технологические комплексы на основе высокотемпературных реакторов / А. Я. Столяревский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 150 с.
5. Водород. Свойства, получение, хранение, транспортирование, применение: Справ. изд. / Д. Ю. Гамбург, В. П. Семенов, Н. Ф. Дубовкин, Л. Н. Смирнова. – М.: Химия, 1989. – 672 с.
6. Klimova V. A. On the problem of efficient production of hydrogen reducing gases for metallurgy utilizing nuclear energy / V. A. Klimova, S. E. Shcheklein, V. M. Pakhaluev // International Journal of Hydrogen Energy. – 2016. – Т. 41. – № 5. – С. 3320-3325.
7. Limin Liu. The role of nuclear energy in the carbon neutrality goal / Limin Liu, Hui Guo, Lihong Dai, Maolong Liu // Progress in Nuclear Energy. – 2023. – Vol. 162. – Article number 104772. – Pp. 1–9.
8. Van Rooijen W. F. G. Gas-Cooled Fast Reactor: A Historical Overview and Future Outlook / W. F. G. Van Rooijen // Science and Technology of Nuclear Installations. – 2009. – Vol. 2009. – Article ID 965757. Pp. 1–11. – <https://doi.org/10.1155/2009/965757>
9. IAEA-TECDOC-1645. High Temperature Gas Cooled Reactor Fuels and Materials. – Vienna.: International atomic energy agency, 2010. – 182 p.
10. Сметанников В. П. Проектирование энергетических установок с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами / В. П. Сметанников, И. Х. Ганев,

В. Д. Колганов и др.; Под ред. чл.-кор. АН СССР И.Я. Емельянова. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 232 с.

11. Zhang Z. The Shandong Shidao Bay 200 MWe High-Temperature Gas-Cooled Reactor Pebble-Bed Module (HTR-PM) Demonstration Power Plant: An Engineering and Technological Innovation / Zuoyi Zhang, Yujie Dong, Fu Li et al. // Engineering. – 2016. – Is.2. – Pp. 112-118.

12. Zhitao Tian Axial helium compressor for high-temperature gas-cooled reactor: A review / Zhitao Tian, Bin Jiang, Adil Malik, Qun Zheng // Annals of Nuclear Energy. – 2019. – Vol. 130. – Pp. 54–68.

13. IAEA Status report 96. High Temperature Gas Cooled Reactor – Pebble-Bed Module (HTR-PM) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aris.iaea.org/PDF/HTR-PM.pdf> (дата обращения 13.08.2019).

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

15. 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.

16. 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. – № 3. – С. 171–175.

17. Климова В. А. Численное моделирование и экспериментальные исследования гидродинамики и теплообмена при радиальном течении газа в аппарате с шаровой насадкой / В. А. Климова, В. М. Пахалуев, С. Е. Щеклеин // Теплоэнергетика. – 2011. – № 4. – С. 52–56.

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.

19. 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: Информационная школа молодого ученого: сборник научных трудов. ЦНБ УрО РАН; отв. ред. П. П. Трескова; сост. О. А. Оганова, Т.В. Пирожок. – Екатеринбург, 2011. – С. 220–232.

20. Боришанский В. М. Сопротивление при движении воздуха через слой шаров / В. М. Боришанский. – В кн.: ЦКТИ им. И. И. Ползунова. Вопросы аэродинамики и теплопередачи в котельно-топочных процессах. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1958. – С. 70–71.

21. Аэров М. Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы работы / М. Э. Аэров, О. М. Тодес, Д. А. Наринский. – Л.: Химия, 1979. – 176 с.

22. Аэров М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес. – Л.: Химия, 1968. – 512 с.

23. Богоявленский Р. Г. Гидродинамика и теплообмен в высокотемпературных ядерных реакторах с шаровыми твэлами. / Р. Г. Богоявленский. – М.: Атомиздат, 1978. – 112 с.

24. Адамова Н. Б. Коэффициенты сопротивления, теплоотдачи и переноса в насыпной активной зоне с шаровыми твэлами (обзор). / Н. Б. Адамова, Р. С. Демешев, В. Н. Крымасов, В. К. Ламба, В. И. Макаров, И. Е. Позмогова, С. В. Попов. – М.: Изд-во МЭИ, 1983. – 52 с.

25. Пономарев–Степной Н. Н., Кухаркин Н. Е., Хрулев А. А. и др. Перспективы применения микротвэлов в ВВЭР. / Н. Н. Пономарев–Степной, Н. Е. Кухаркин, А. А. Хрулев и др. // Атомная энергия. – 1999. – Т. 86. – Вып. 6. – С. 443–449.

26. Филиппов Г. А. Перспективы создания прямоточных микротвэльных ядерных реакторов с перегревом пара. / Г. А. Филиппов, Р. Г. Богоявленский // Тяжелое машиностроение. – 2002. – №1. – С. 7–11.

27. Сморчкова, Ю. В. Исследование теплогидравлических характеристик шаровых засыпок при радиальном течении теплоносителя в условиях объемного тепловыделения : дисс. ... канд. техн. наук : 01.04.14. / Сморчкова Юлия Владимировна. – М.: 2018. – 155 с.
28. Лелеков В. И. Исследование гидродинамики и теплопередачи в каналах с радиальным течением теплоносителя / В. И. Лелеков, Л. П. Смирнов и др. // Вопросы атомной науки и техники, серия: Атомно-водородная энергетика и технология. – 1980. – Вып. 2 (7). – С. 148–150.
29. Лелеков В. И. Особенности теплообмена и гидродинамики в ТВС со сферическими твэлами и радиальной раздачей газа / В. И. Лелеков // Атомная энергия. – 2000. – Т. 89. – Вып. 2. – С. 105–117.
30. Лелеков В. И., Пермяков А. Б., Авцинов А. Н. Экспериментальное изучение гидродинамической обстановки в технологических аппаратах с насадками в виде сферических элементов / В. И. Лелеков, А. Б. Пермяков, А. Н. Авцинов // Энергосбережение и водоподготовка. – 2008. – № 4 (54). – С. 69–72.
31. Бедениг Д. Газоохлаждаемые высокотемпературные реакторы / Д. Бедениг. – М., Атомиздат, 1975. – 224 с.
32. Абросимов Н. Г. ВТГР – новые перспективы ядерной энергетики / Н. Г. Абросимов, Н. Г. Кодочигов, Л. Е. Кузнецов и др. // Атомная энергия. – 2020. – Т. 129. – №1. – С. 51-53.
33. IAEA-TECDOC-1238. Gas turbine power conversion systems for modular HTGRs. / Vienna: IAEA, 2001. – 209 с.
34. IAEA-TECDOC-382. Evaluation of high temperature gas cooled reactor performance: Benchmark analysis related to initial testing of the HTTR and HTR-10 / Vienna: IAEA, 2003. – 231 с.
35. Operating experience with nuclear power stations in member states (2024 edition) / Vienna: IAEA, 2024. – 1581 с.
36. Ташлыков О. Л. Основы ядерной энергетики : учебное пособие / О. Л. Ташлыков. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 212 с.

37. Карпов В. А. Топливные циклы и физические особенности высокотемпературных реакторов / В. А. Карпов. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 128 с.
38. Исследования топлива высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов в мире / Д. С. Дюсамбаев, Ш. Х. Гизатулин, А. А. Шаймерденов и др. // Вестник Казахского национального университета. Серия физическая. – 2018. – № 2 (65). – С. 19-26.
39. Шаманин И. В. Высокотемпературные ядерные энергетические технологии / И. В. Шаманин, П. М. Гаврилов // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316. – №4. – С. 5-9.
40. Verfondern K. Coated Particle Fuel For High Temperature Gas Cooled Reactors / K. Verfondern, H. Nabelek and J. M. Kendall // Nuclear Engineering and Technology. – 2007. – Vol. 39. – No. 5. – Pp. 603–616.
41. Проценко А. Н. Основные требования к ядерным источникам энергии для технологических производств и высокотемпературные ядерные реакторы / А. Н. Проценко, И. Г. Белоусов // Атомно-водородная энергетика и технология. – 1980. – Вып. 3. – С. 5-56.
42. Ананьев К. П. Роль газа как теплоносителя в развитии атомных электростанций / К. П. Ананьев, Г. Н. Кружилин // Атомная энергия. – 1976. – Т. 40. – Вып. 1. – С. 3-11.
43. Fu J. Overview and progress of high temperature reactor pebble-bed module demonstration project (HTR-PM) / J. Fu, Y. Jiang, H. Cheng, W. Cheng // Proceedings of the HTR 2014, Weihai, China, October 27–31. – 2014. – Paper HTR2014-11125.
44. Sato H. GTHTTR300 – A nuclear power plant design with 50% generating efficiency / H. Sato, X. L. Yan, Y. Tachibana, K. Kunitomi. // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 275. – Pp. 190-196.
45. Kunitomi K. GTHTTR300C for hydrogen cogeneration / K. Kunitomi, X. Yan, Sh. Shiozawa, N. Fujimoto. // Proc. of 2nd International Topical Meeting On High Temperature Reactor Technology. Beijing, China, September 22-24, 2004. – 2004. – Paper D18.

46. IAEA-TECDOC-1485. Status of Innovative Small and Medium Sized Reactor Designs 2005 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1485_web.pdf (дата обращения 19.08.2019).
47. IAEA Status report 70. Pebble Bed Modular Reactor (PBMR) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://aris.iaea.org/PDF/PBMR.pdf> (дата обращения 13.08.2019).
48. Шимкевич И. Реализация проекта модульного реактора с шаровыми ТВЭлами PBMR / И. Шимкевич. // Бюллетень по атомной энергии. – 2006. – №8. – с. 64–69.
49. Гребенник В. Н. Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы – инновационное направление развития атомной энергетики / В. Н. Гребенник, Н. Е. Кухаркин, Пономарев-Степной Н. Н. – М.: Энергоатомиздат, 2008. – 136 с.
50. Qu X. A study on different thermodynamic cycle schemes coupled with a high temperature gas-cooled reactor / X. Qu, X. Yang, J. Wang // Annals of Nuclear Energy. – 2017. – Vol. 106. – Pp. 185–194.
51. Yang X. Combined cycle-coupled high-temperature and very high-temperature gas-cooled reactors: Part I – Cycle optimization / X. Yang, X. Qu, J. Wang // Annals of Nuclear Energy. – 2019. – Vol. 134. – Pp. 193–204.
52. Васяев А.В. Пути повышения эффективности ВТГР с газотурбинным блоком преобразования энергии / А. В. Васяев, В. Ф. Головкин, И. В. Дмитриева, Н. Г. Кодочигов. // Тяжелое машиностроение. – 2009. – №9. – С. 7-10.
53. Пономарев-Степной Н. Н. Состояние работ по ВТГР в мире / Н. Н. Пономарев-Степной, А. Н. Проценко, В. Н. Гребенник // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика и технология. – 1984. – Вып. 2(18). – С. 3-11.
54. Yan X. GTHTTR300 Design Variants for Production of Electricity, Hydrogen or Both / X. Yan, K. Kunitomi, R. Hino and S. Shiozawa // Nuclear Production of Hydrogen. Third Information Exchange Meeting, Oarai, Japan, 5-7 October 2005. – 2006. – Pp. 121–139.

55. Kiryushin A. I. Project of the GT-MHR high-temperature helium reactor with gas turbine / A. I. Kiryushin, N. G. Kodochigov, N. G. Kuzavkov et al. // Nuclear Engineering and Design. – 1997. – V. 173. – Pp. 119-129.
56. Костин В. И. Развитие проекта блока преобразования энергии ГТ-МГР / В. И. Костин, Н. Г. Кодочигов, С. Е. Белов, А. В. Васяев, В. Ф. Головкин, А. Шеной // Атомная энергия. – 2007. – Т. 102, №1. – С. 57-63.
57. Кодочигов Н.Г. Возможности эксплуатации ГТ-МГР с разным топливом / Н. Г. Кодочигов, Ю. П. Сухарев, Е. В. Марова, С. Г. Усынина // Атомная энергия. – 2007. – Т. 102. – №1. – С. 68–71.
58. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 05.08.2021 №2162-р [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/5JFns1CDAKqYKzZ0mnRADAw2NqcVsex1.pdf>
59. Аналитическое исследование. Развитие водородной энергетики в России (2021) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://delprof.ru/upload/iblock/eef/DelProf_Analitika_Vodorodnaya-energetika.pdf
60. Газ природный [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://neftegaz.ru/tech-library/energoresursy-toplivo/141748-gaz-prirodnyy/?ysclid=la7zmrs83i903603367>
61. Yin H. Thermodynamic Analysis of Thermal Efficiency of HTR-10 Hydrogen Production System / H. Yin, Sh. Jiang, Yu. Zhang, H. Ju // Journal of Nuclear Science and Technology. – 2006. – Vol. 43, No. 10. – Pp. 1188-1193.
62. Аминов Р. З. Оценка эффективности водородных циклов на базе внепиковой электроэнергии АЭС / Р. З. Аминов, А. Н. Байрамов, О. В. Шацкова // Теплоэнергетика. – 2009. – №11. – С. 41-44.
63. Шпильрайн, Э. Э. Введение в водородную энергетику. / Э. Э. Шпильрайн, С. П. Малышенко, Г. Г. Кулешов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 264 с.
64. Окада С. Новые пути использования атомной энергии / С. Окада, К. Савва // Атомная техника за рубежом. – 2005. – № 3. – С. 27–28.

65. Kasahara S. JAEA's R&D on the thermochemical hydrogen production process / S. Kasahara, N. Tanaka, H. Noguchi et al. // Proceedings of the HTR 2014, Weihai, China, October 27–31. – 2014. – Paper HTR2014-21233.
66. Orhan M. Design and simulation of a UOIT copperechlorine cycle for hydrogen production / M. Orhan, I. Dincer, M. Rosen // International Journal of Energy Research. – 2013. – Vol. 37. – Pp. 1160-1174. – DOI: 10.1002/er.2928.
67. Sato H. Safety design consideration for HTGR coupling with hydrogen production plant / H. Sato, H. Ohashi, Nakagawa Sh. et al. // Progress in Nuclear Energy. – 2015. – Vol. 82. – Pp. 46-52.
68. Щеклеин С. Е. Производство метанола на основе прямоточного газогенератора и ядерного реактора / С. Е. Щеклеин, А. М. Дубинин // Атомная энергия. – 2018. – Т. 124. № 2. – С. 76-79.
69. Ерохов В. И. Эффективность применения диметилэфира на автомобильном транспорте / В. И. Ерохов // Транспорт на альтернативном топливе. – 2015. – №1(43). – С. 30–44.
70. Юсфин Ю.С. Новые процессы получения металла (металлургия железа). / Ю. С. Юсфин, А. А. Гиммельфарб, Н. Ф. Пашков. – М.: Metallurgy, 1994. – 320 с.
71. Yan, X. Study of a nuclear energy supplied steelmaking system for near-term application / X. Yan, S. Kasahara, Y. Tachibana, K. Kunitomi. // Energy. – 2012. – Vol. 39. – Pp. 154–165.
72. 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. – Pp. 935–941.
73. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое. / М. А. Гольдштик. – Новосибирск: Институт теплофизики СО АН СССР. 1984. – 162 с.
74. Бурданов Н. Г. Исследование гидравлического сопротивления каналов с шаровыми / Н. Г. Бурданов, Л. Е. Костиков, В. В. Лозовецкий и др. – В кн.: Сборник трудов МВТУ. Исследование процессов энергетических установок. № 223, вып. 3. – М.: Изд. МВТУ, 1976. – С. 25.

75. Wu Zh. Experimental and numerical study on helium flow characteristics in randomly packed pebble bed / Wu Zh. et al. // *Annals of Nuclear Energy*. – 2019. – Vol. 128. – Pp. 268-277.
76. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. / С. С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
77. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука», 1970. – 904 с.
78. Ergun S. Fluid flow through packed columns / S. Ergun // *Chemical engineering progress*. – 1952. – Vol. 48. – No. 2. – Pp. 89–94.
79. Справочник по теплообменникам: в 2-х т. Том 1 / Пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко и др. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 528 с.
80. Деменок, С. Л. Гидродинамика и теплообмен в шаровых укладках : учебное пособие для вузов / С. Л. Деменок, В. В. Медведев, С. М. Сивуха. — Санкт-Петербург : Страта, 2018. — 192 с.
81. Чуханов З. Ф. Динамика процесса швелевания твердого топлива. Сообщ. 1 / З. Ф. Чуханов , Е. А. Шапатина // *Изв. АН СССР. Отд-ние техн. наук*. – 1945. – № 7/8. – С. 746–763.
82. Леонтьев А. И. К проблеме реламинаризации сверхзвуковых турбулентных пограничных слоев на осесимметричных телах в летных условиях при наличии теплообмена / А. И. Леонтьев, А. М. Павлюченко // *Теплофизика высоких температур*. – 2004. – Т. 42. – №5. – С. 725–739.
83. Зубков В. Г. Об изменениях структуры турбулентных течений под действием ускоренного потока // *ИФЖ*. – 1990. – Т. 59. – № 2. – С. 196–202.
84. Кутателадзе С.С. Пристенная турбулентность. / С. С. Кутателадзе. – Новосибирск: Наука, 1973. – 228 с.
85. Танака Х., Кавамура Х., Татено А., Хатамия С. Влияние ламинаризации потока и его последующей турбулизации на теплообмен в случае течения при малых числах Рейнольдса в канале, состоящем из конфузорной секции и следующей за

ней секции с постоянным поперечным сечением. / Х. Танака, Х. Кавамура, А. Татено, С. Хатамия. // Труды американского общества инженеров-механиков. Теплопередача. –1982. – №2. – С. 144–153.

86. Альгинов Р.А. Явление реламинаризации турбулентного газового потока в условиях пространственной деформации рабочей среды в осесимметричных каналах. / Р. А. Альгинов, С. Н. Харламов // Проблемы геологии и освоения недр. Труды XIII Международного симпозиума им. академика М. А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 110-летию со дня рождения профессора, Лауреата Государственной премии СССР К. В. Радугина. – Томск, Изд-во ТПУ, 2009. – С. 592–594.

87. Кутателадзе С.С. Справочник по теплопередаче. / С. С. Кутателадзе, В. М. Боришанский. – М.: Изд-во ГЭИ, 1959. – 414 с.

88. Павловский В. А. Вычислительная гидродинамика. Теоретические основы. / В. А. Павловский, Д. В. Никущенко. – СПб.: Издательство «Лань», 2018. – 368 с.

89. IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NR-T-1.20. Summary Review on the Application of Computational Fluid Dynamics in Nuclear Power Plant Design. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2022. – 94 p.

90. ГОСТ Р.57700.20-2020. Компьютерные модели и моделирование. Классификация. – М.: Стандартинформ, 2023. – 11 с.

91. Huning A. J. A review of recent advances in HTGR CFD and thermal fluid analysis / A. J. Huning, S. Chandrasekaran, S. Garimella // Nuclear Engineering and Design. – 2021. – Vol. 373. – Article number 111013.

92. SolidWorks Flow Simulation Technical Reference. – Dassault Systems, 2021. – 160 с. – Режим доступа <https://www.cati.com/wp-content/uploads/2021/04/swflow2021-technical-reference.pdf>

93. Matsson J. E. An Introduction to ANSYS Fluent 2022. / J. E. Matsson. – SDC Publications, 2022. – 688 с.

94. Comsol Multiphysics User's Guide. Version 4.3. – COMSOL, 2012. – 1292 с.

95. Седов Л. И. Механика сплошной среды. В 2-х томах. Т. 1. / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1970 г. – 492 стр.

96. Исаченко В. П. Теплопередача. Учебник для вузов. / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
97. Снегирёв А. Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 143 с.
98. Мазо А. Б. Вычислительная гидродинамика. Часть 1. Математические модели, сетки и сеточные схемы. Учебное пособие / А.Б. Мазо. – Казань: Казан. ун-т, 2018. – 165 с.
99. Langley Research Center. Turbulence Modeling Resource [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://turbmodels.larc.nasa.gov/> (дата обращения 04.04.2025)
100. Бессонов И. А. Оценка использования программного пакета Comsol Multiphysics для исследования течения в пористых телах / И. А. Бессонов, А. А. Бресусова, Д. А. Кораблев, О. Л. Ташлыков, В. А. Климова // X информационная школа молодого ученого, Екатеринбург, 19-22 сентября 2022 г. – Екатеринбург, Центральная научная библиотека УрО РАН, ООО "Издательство УМЦ УПИ", 2022. – С. 488–497.
101. 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: Информационная школа молодого ученого. – Екатеринбург: ЦНБ УрО РАН, 2011. – С. 220–232.
102. 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.
103. Климова В. А. Исследование теплогидравлических характеристик газовых потоков применительно к проблеме создания ядерно-технологических комплексов / В. А. Климова, В. М. Пахалуев // В сборнике: IV Информационная школа моло-

дого ученого. Всероссийская междисциплинарная молодежная конференция с международным участием, сборник научных трудов. – Екатеринбург: ЦНБ УрО РАН, 2014. – С. 237–246.

104. Климова В. А. Особенности теплообмена шаровых твэлов при радиальном течении газового теплоносителя. / В. А. Климова, В. М. Пахалуев // Научные труды XIV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ: сборник статей. В 3-х ч. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2008. – Ч.1. – С. 331–332.

105. Теплотехнические измерения и приборы

106. Савченко Г. Б. Приборы и методы измерений. Мониторинг (курс лекций). Часть 1. / Г. Б. Савченко. – Санкт-Петербург: Изд-во БГТУ, 2004. – 132 с.

107. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя / Г. Шлихтинг // М.: «Наука», 1974. – 711 с.

108. Шорин В. П. Акустические методы и средства измерения пульсаций давления / В. П. Шорин, Е. В. Шахматов, А. Г. Гимадиев. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2007. – 132 с.

109. Блюдзе Ю.Г. Исследование турбулентных пульсаций давления при ненулевом градиенте среднего давления / Ю. Г. Блюдзе, О. Н. Докучаев, А. В. Смольяков, В. М. Ткаченко // Труды Центрального научно-исследовательского института им. Академика А.Н. Крылова. – 1965. – № 224. – С. 37–45.

110. Патент № SU618666A1 СССР, М. Кл2 G 01 L 9/02. Электретный датчик давления : № 2134296/18-10 : заявл. 15.05.1975 : опубл. 05.08.1978 / Петров В.М. – Изобретения. – 1978. – № 29. – 2 с.

111. Дмитриева О. П. Электретный преобразователь малых давлений для средств аналитической техники / О. П. Дмитриева, Л. В. Ильясов. // Инновации в науке. – 2016. – № 3 (52). – С. 54–61.

112. Чжен П. Отрывные течения / П. Чжен // М.: "Мир", Т. 2, 1973. – 278 с.

113. Петровский В. С. Гидродинамические проблемы турбулентного шума / В. С. Петровский // Л.: Судостроение, 1966. – 250 с.

114. Довгаль А. В. Неустойчивость течения в зоне отрыва ламинарного пограничного слоя к сходу периодических вихрей / А. В. Довгаль, А. М. Сорокин // Теплофизика и аэродинамика. – 2001. – Т. 8. – № 2. – С. 189–197.
115. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука, 1977. 447 с.
116. Lienhard J. H. Synopsis of lift, drag, and vortex frequency data for rigid circular cylinders / J. H. Lienhard. // College of engineering research division. – 1966. – Bul. 300. – С. 1–36.
117. Калинин, Э. К. Интенсификация теплообмена в каналах / Э. К. Калинин, Г. А. Дрейцер, С. А. Ярхо. – М.: Машиностроение, 1990. – 206 с.
118. Леонтьев А. И. Исследование пульсационной структуры теплового пограничного слоя в условиях ламинаризации потока / А. И. Леонтьев, Е. В. Шитов, В. Н. Афанасьев // «Тепломассообмен–IV». –1980. – Т. 1. – Ч. II. – С. 136.
119. Леонтьев А. И. К проблеме реламинаризации сверхзвуковых турбулентных пограничных слоев на осесимметричных телах в летных условиях при наличии теплообмена / А. И. Леонтьев, А. М. Павлюченко // Теплофизика высоких температур. – 2004. – Т. 42. – № 5. – С. 725-739.
120. Гапонов С. А. Эффективность инвариантного градиентного критерия устойчивости для натуральных условий обтекания осесимметричных тел в зонах начала перехода и реламинаризации / С. А. Гапонов, А. М. Павлюченко, А. Н. Попков // Прикладная механика и техническая физика. – 1999. – Т. 40. – № 1. – С. 89.
121. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик. – М.: Издательство «Наука», 1972. – 720 с.
122. Зиновьев В. Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. Справочник. / В. Е. Зиновьев. – М.: Металлургия, 1989. – 384 с.
123. Телегин А. С. Тепломассоперенос: Учебник для вузов. / А. С. Телегин, В. С. Швыдкий, Ю. Г. Ярошенко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.
124. Пронин В. А. Локальные теплоаэродинамические характеристики в межтрубных каналах с присоединенными вихрями / В. А. Пронин, А. В. Дозорцев // Теплоэнергетика. – 2006. – №7. – С. 75–80.

125. Пронин В. А. Измерение гидродинамических характеристик и теплоотдачи в тесных поперечнообтекаемых трубных пучках. Энергетически эффективный способ размещения труб в пучке : автореферат дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.05 / Пронин Владимир Алексеевич. – М., 1990. – 20 с.
126. Комиссаров Ю. А. Процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов / Ю. А. Комиссаров, Л. С. Гордеев, Д. П. Вент. – М.: Издательство Юрайт, 2025. – 1242 с.
127. Амелин А. Г. Общая химическая технология / А. Г. Амелин, А. И. Малахов, И. Е. Зубова, В. Н. Зайцев. Под ред. проф. Амелина А. Г. – М.: Химия, 1977. – 400 с.
128. Жускаускас А. А. Теплопередача поперечно обтекаемых пучков труб / А. А. Жускаускас. – Вильнюс: Макалас, 1986. – 209 с.
129. Хинце И. О. Турбулентность, ее механизм и теория / И. О. Хинце. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 681 с.
130. Пахалуев В. М. Основы метрологии: учебное пособие / В. М. Пахалуев, Н. Н. Акифьева. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2004. – 145 с.
131. Пономарев-Степной Н. Н. Атомно-водородная энергетика: системные аспекты и ключевые проблемы / Н. Н. Пономарев-Степной, А. Я. Столяревский, В. П. Пахомов. – Москва: Энергоатомиздат, 2008. – 107 с.
132. Ярошенко Ю. Г. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии: учеб. пособие / Ю. Г. Ярошенко, Я. М. Гордон, И. Ю. Ходоровская – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. – 670 с.
133. Gordon Y. The modern technology of iron and steel production and possible ways of their development / Y. Gordon, S. Kumar, M. Freislich, Y. Yaroshenko // Izvestiya Ferrous Metallurgy. – 2015 – Vol. 58. – No. 9. – Pp. 630-637.
134. Косова Н.И. Получение диметилового эфира из СО и Н₂ / Н.И Косова, Л. Н. Курина, Л. П. Шиляева // Журнал физической химии. – 2011. Т. 85. – №. 7. – С. 1–5.
135. Крылов И. Ф., Емельянов, В. Е. Альтернативные дизельные топлива. Диметиловый эфир // И. Ф. Крылов, В. Е. Емельянов. // Мирнефтепродуктов. – 2007. – № 2. – С. 38–39.

136. Ge Q. A new catalysts for direct synthesis of dimethyl ether from synthesis gas / Q. Ge, Q. Huang; F. Qiu // *React. Kinet. Catal. Lett.* – 1998. – V. 63. – № 1. – Pp. 137–142.
137. Корякин Ю.И. Дальнее атомное теплоснабжение – вторая главная задача ядерной энергетики России XXI века // *Новости теплоснабжения.* – 2002. – № 7. – С. 5-13.
138. Щеклеин С.Е. Повышение энергоэффективности АЭС / С. Е. Щеклеин, О. Л. Ташлыков, А. М. Дубинин // *Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика.* – 2015. – № 4. – С. 15-25.
139. Лутьянов, А. Ф. Техничко-экономическая эффективность атомных станций дальнего теплоснабжения на базе ВТГР : дисс. ... канд. техн. наук : 05.14.01. / Лутьянов Александр Феликсович. – М.: 1984. – 255 с.
140. Форсберг Ч. Производство водорода как одно из основных применений ядерной энергии / Ч. Форсберг, К. Педдикорд // *Атомная техника за рубежом.* – 2002. – №7. – С. 16–19.
141. Дементьев Б. А. Ядерные энергетические реакторы: учебник для вузов. / Б. А. Дементьев. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 280 с.
142. Маргулова Т. Х. Атомные электрические станции: учебник для вузов. / Т. Х. Маргулова. – М.: Высшая школа, 1984. – 304 с.
143. Пащенко Д. И. Производство водорода в системах химической регенерации теплоты дымовых газов / Д. И. Пащенко. // *Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология».* – 2009. – №6 (74). – С. 11–15.
144. Кириллов П. Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). / П. Л. Кириллов, Ю. С. Юрьев, В. П. Бобков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.
145. Попов С.В. Стационарная теплофизика ВТГР с засыпной активной зоной. – *Атомно-водородная энергетика и технология.* – 1982. – Вып. 4. – С. 126–179.
146. Климова В. А. Атомная станция дальнего теплоснабжения на базе конверсии метана / В. А. Климова // *Энерго- и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Не-*

традиционные 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.

147. Дубковский В. А. Методика расчета конвертора природного газа, выполненного из трубок Фильда / В. А. Дубковский, Г.П. Верхивкер, В. П. Кравченко // Труды Одесского политехнического университета. – 2005. – Вып. 2 (24). – С. 95-100.

148. Бажан П. И. Справочник по теплообменным аппаратам. / П. И. Бажан, Г. Е. Каневец, В. М. Селиверстов. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.

149. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию. Под ред. Ю.И. Дытнерского. – М: Химия 1991. – 496 с.

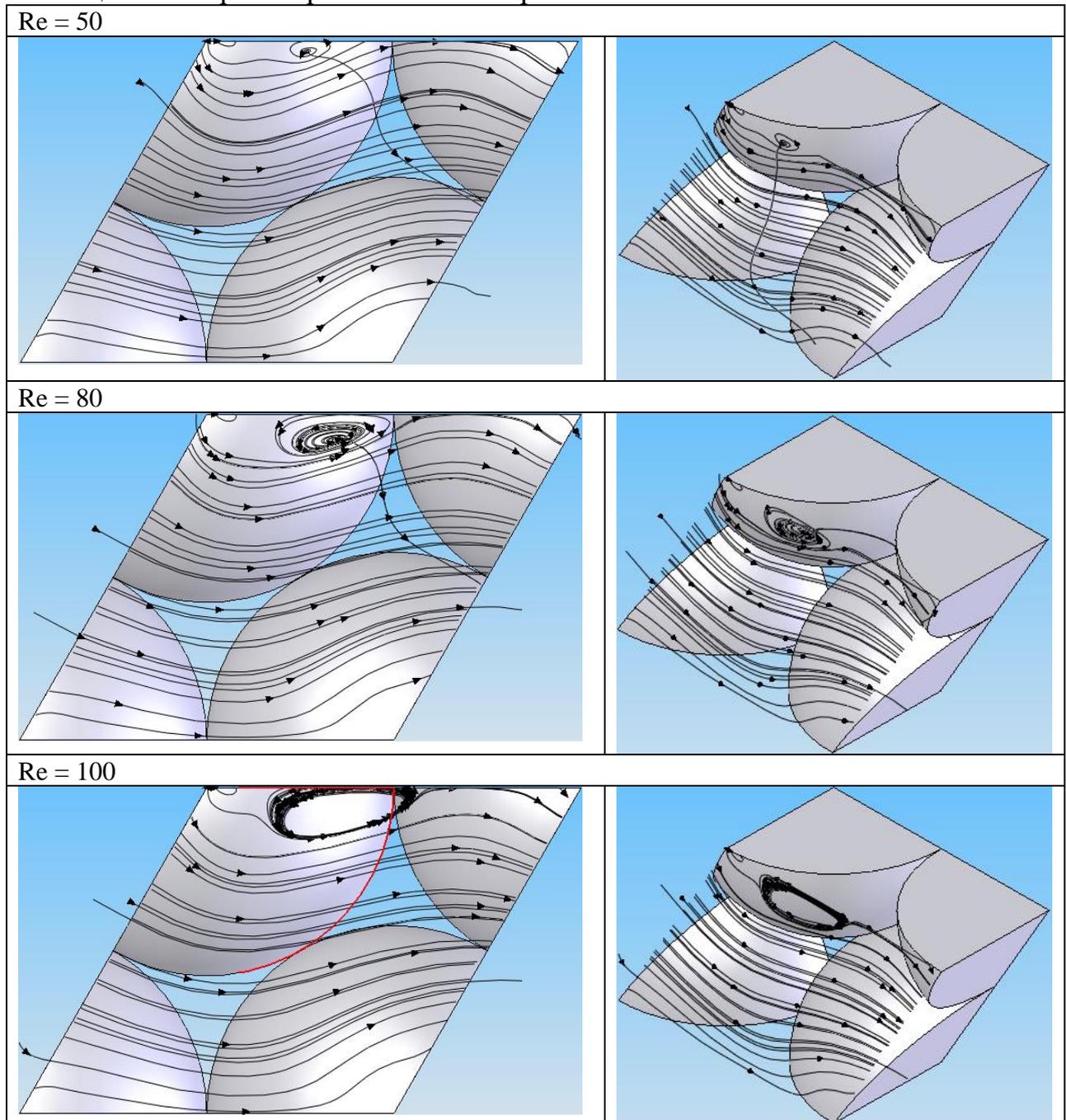
150. Александров А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. / А. А. Александров, Б. А. Григорьев. – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 168 с.

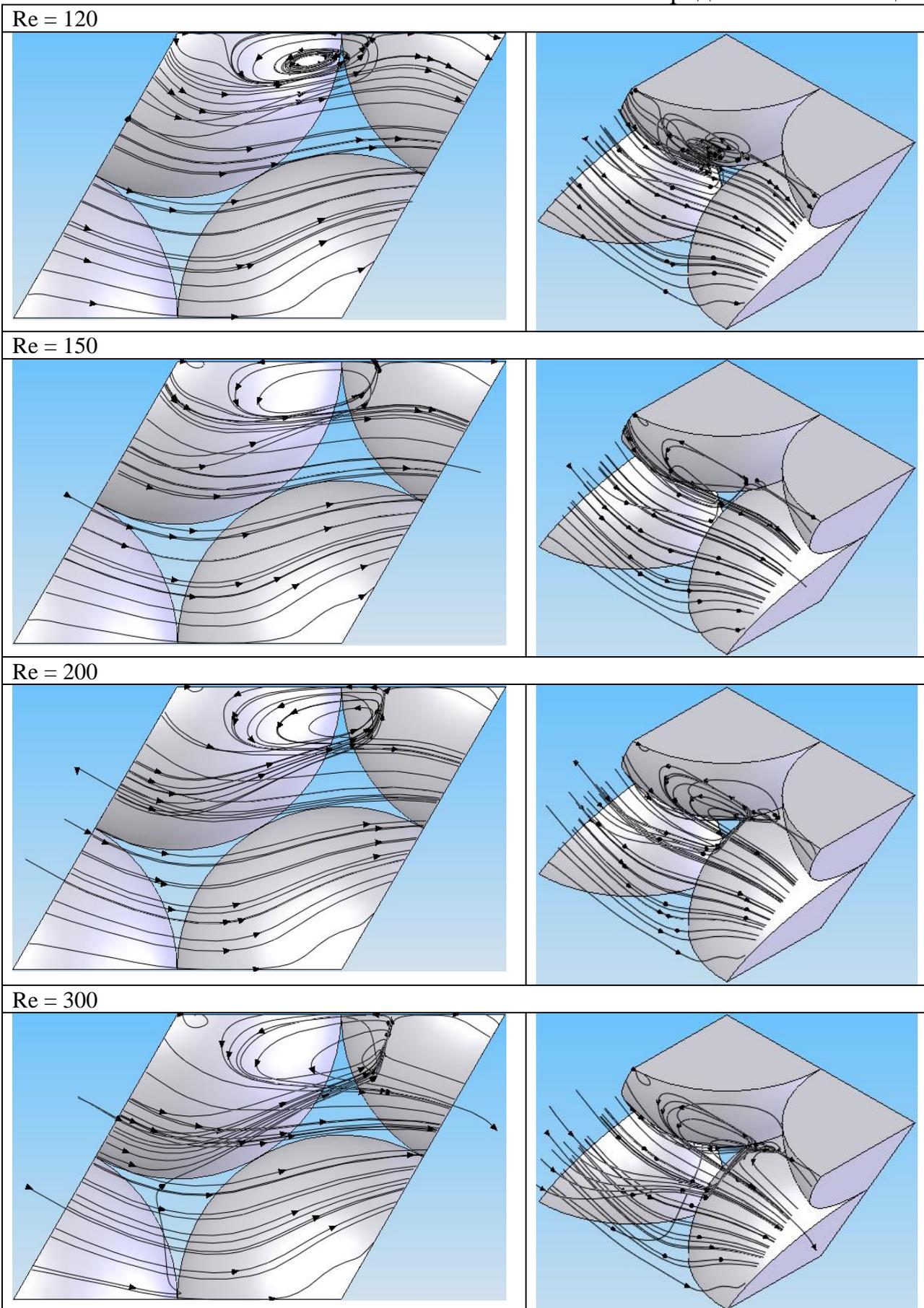
Приложение А

РЕЗУЛЬТАТЫ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ЭЛЕМЕНТАРНОЙ ШАРОВОЙ ЯЧЕЙКЕ

Основные результаты компьютерного моделирования гидродинамики и теплообмена в элементарной шаровой ячейке приведены в таблицах А1 и А2.

Таблица А.1 – Траектории потока в шаровой ячейке без теплообмена





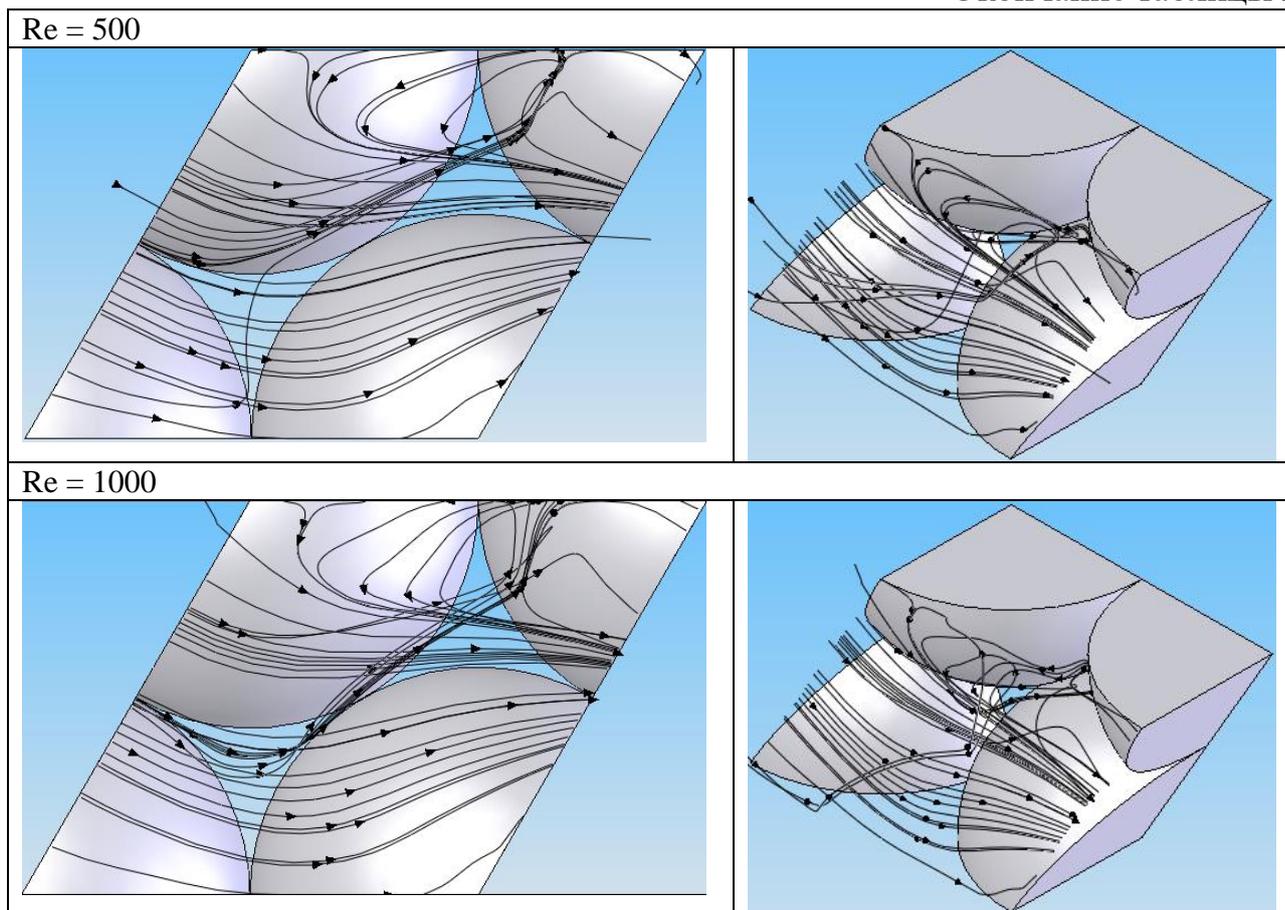
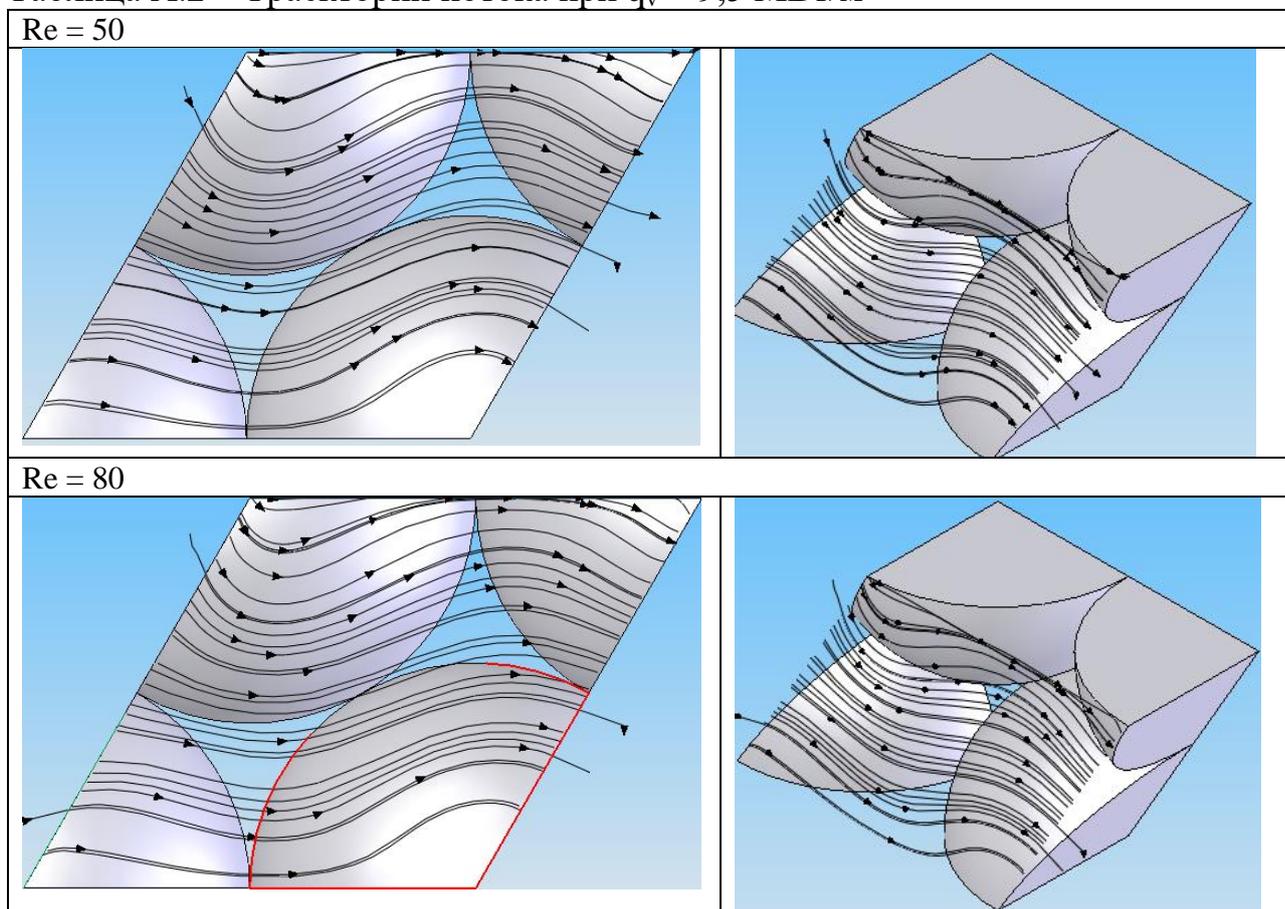
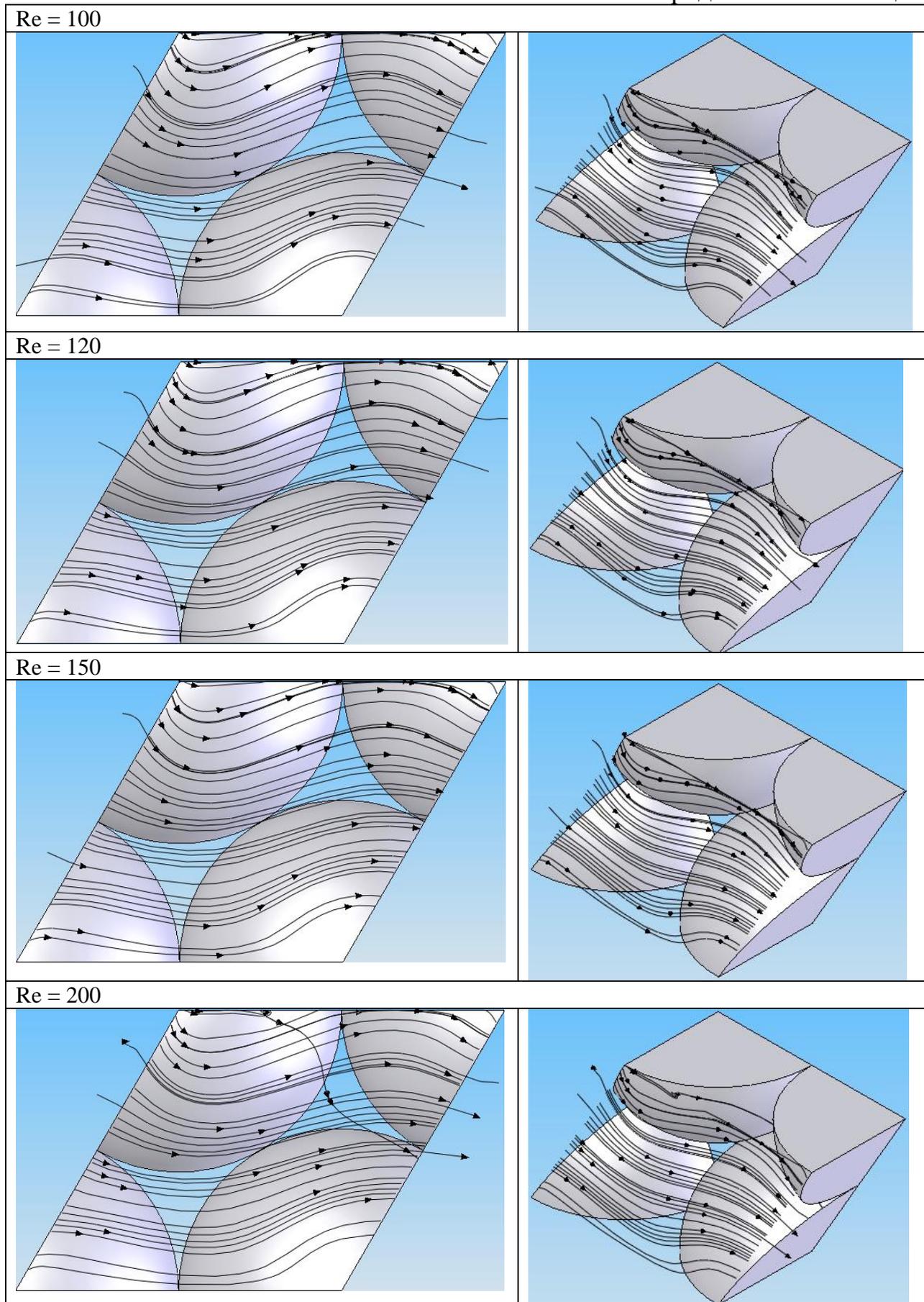


Таблица А.2 – Траектории потока при $q_v = 9,5 \text{ МВт/м}^3$





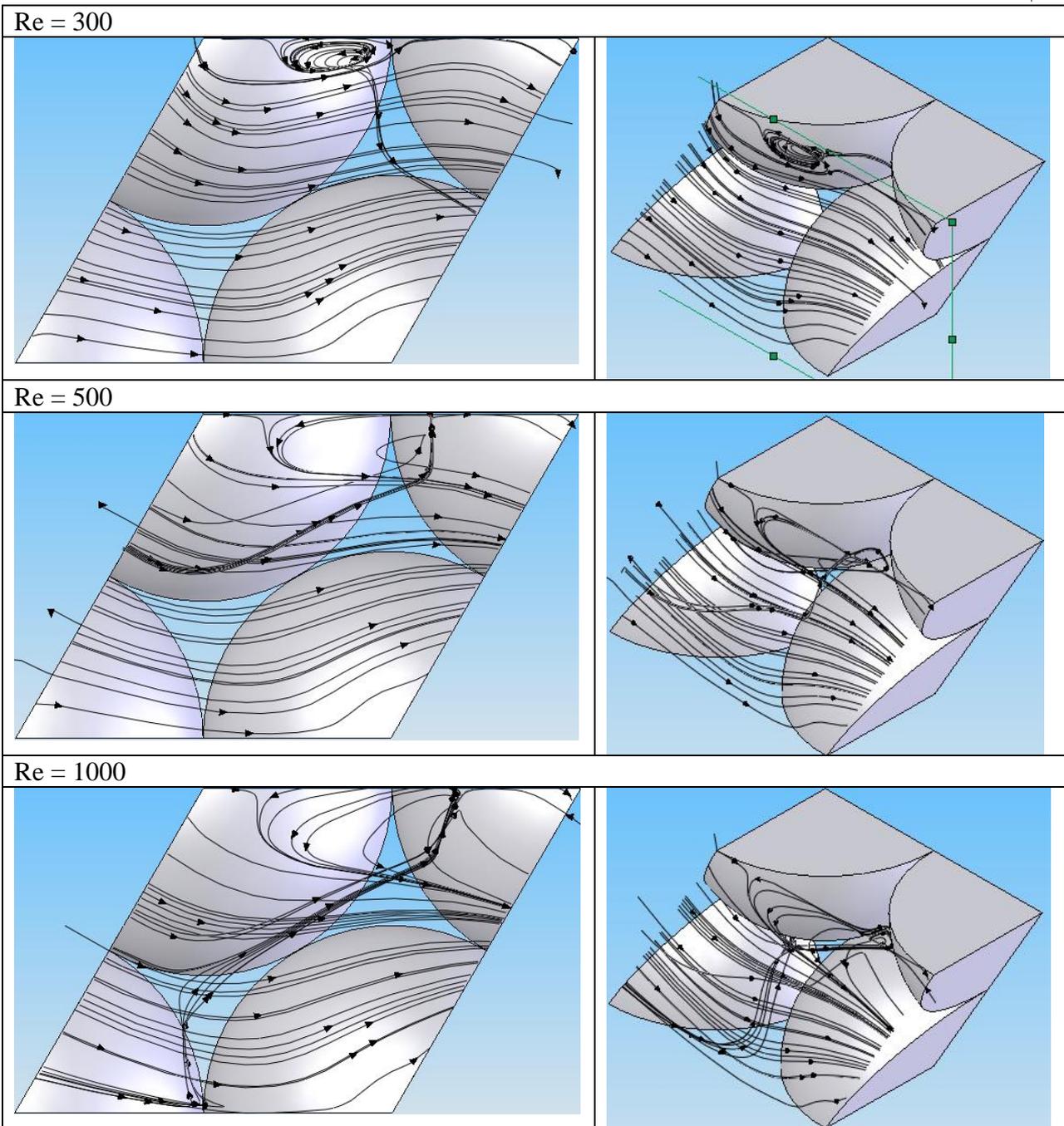
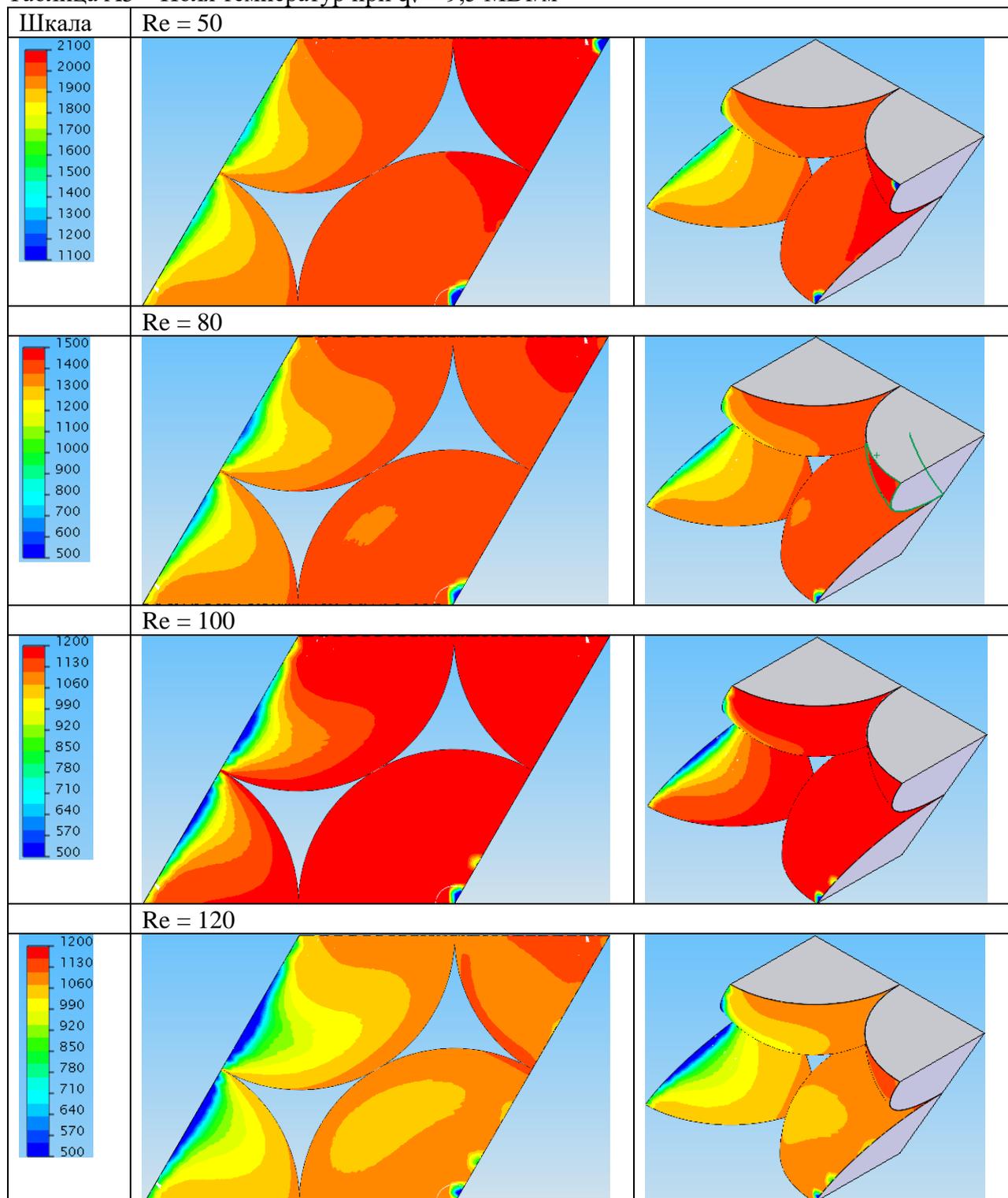
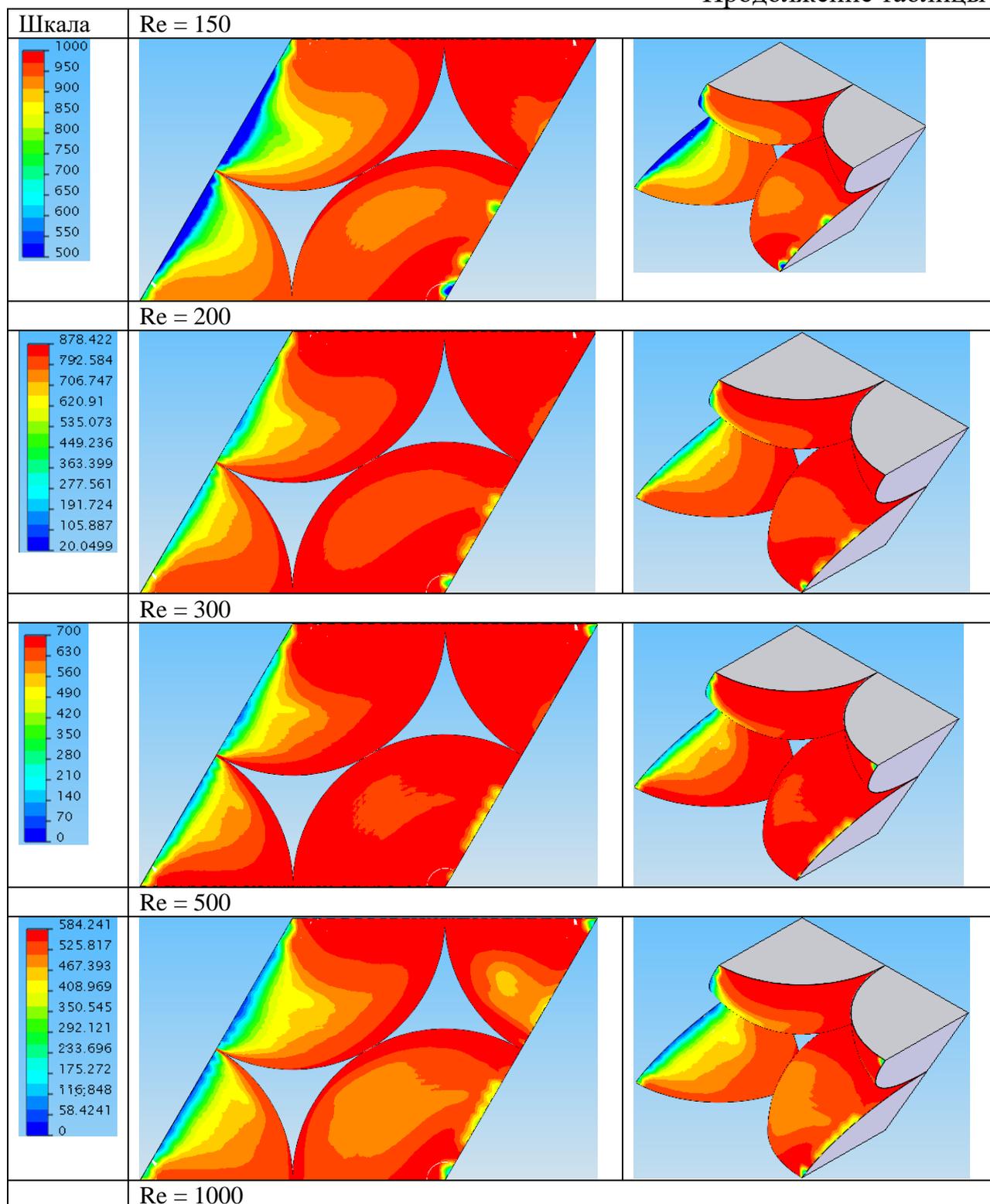
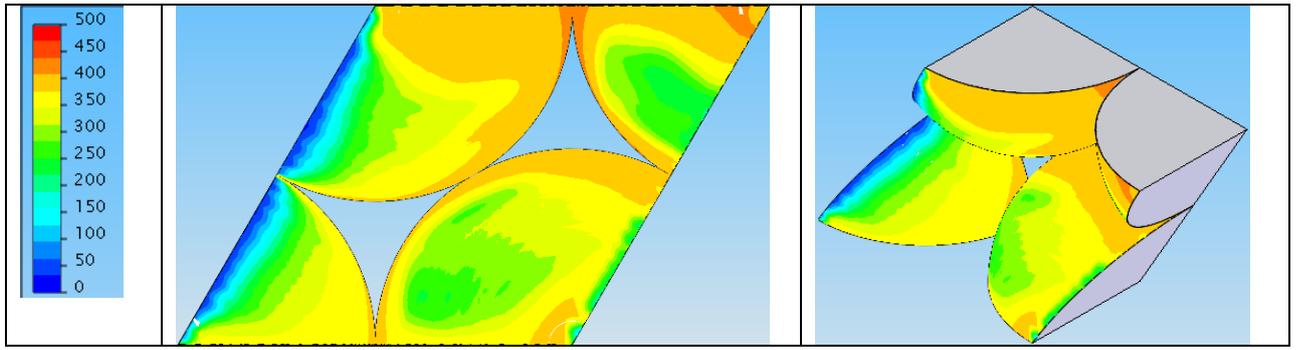


Таблица А3 – Поля температур при $q_v = 9,5 \text{ МВт/м}^3$







Приложение Б

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРИСТОСТИ ШАРОВОЙ ЗАСЫПКИ

Пористость шаровой засыпки определялась по отношению плотности шарового элемента к общей плотности засыпки:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{нас}}{\rho_{ш}}, \quad (\text{Б.1})$$

где $\rho_{нас}$ – насыпная плотность шаровой засыпки, кг/м³;

$\rho_{ш}$ – плотность материала шаровых элементов, кг/м³.

Плотность материала шаровых элементов определялась как

$$\rho_{ш} = \frac{m}{v}, \quad (\text{Б.2})$$
$$v = \frac{\pi d_{ш}^3}{6},$$

где m – масса шарового элемента, кг;

v – объем шарового элемента, м³;

$d_{ш}$ – диаметр шарового элемента, м.

Насыпная плотность засыпки определялась как

$$\rho_{нас} = \frac{M - M_n}{V}, \quad (\text{Б.3})$$
$$V = \frac{\pi}{4} (r_n^2 - r_g^2) \cdot L,$$

где M – масса насадки с шаровой засыпкой, кг;

M_n – масса пустой насадки, кг;

V – объем насадки, м³;

r_n и r_g – наружный и внутренний радиусы насадки, соответственно, м;

L – высота насыпного слоя, м.

Усредненные результаты измерений приведены в таблице Б.1.

Таблица Б.1 - Усредненные результаты измерений пористости шаровой засыпки

Параметр	d _ш , мм		
	7	15	25
Шаровой элемент:			
m, кг	$1,510 \cdot 10^{-4}$	$1,448 \cdot 10^{-3}$	$7,171 \cdot 10^{-3}$
v, м ³	$1,796 \cdot 10^{-7}$	$1,767 \cdot 10^{-6}$	$8,181 \cdot 10^{-6}$
$\rho_{ш}$, кг/м ³	840,8	819,4	876,5
Насадка 1:			
$r_B \times r_H \times L$, м	0,014 × 0,1 × 0,055		
V, м ³	$1,694 \cdot 10^{-3}$		
M _п , кг	0,640		
M, кг	1,623	1,474	1,467
$\rho_{нас}$, кг/м ³	580,3	492,3	488,2
ε	0,310	0,399	0,443
Насадка 2:			
$r_B \times r_H \times L$, м	0,014 × 0,04 × 0,055		
V, м ³	$2,426 \cdot 10^{-4}$		
M _п , кг	0,431		
M, кг	0,571	0,557	-
$\rho_{нас}$, кг/м ³	581,2	523,5	-
ε	0,309	0,361	-

Приложение В

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ШАРОВОЙ ЗАСЫПКИ С РАДИАЛЬНЫМ ТЕЧЕНИЕМ ГАЗА

Результаты измерений коэффициента гидродинамического сопротивления приведены в таблице В.1.

Таблица В.1 – Сводные результаты измерений гидродинамического сопротивления шаровой засыпки с радиальным течением газа

№	h, мм	G _v , м ³ /с	U, м/с	Re	H ₀ , мм	H, мм	Δp, Па	ξ	Условия
1	50	0,0156	1,88	870	60	120	587	79,6	d _ш = 0,007 м r _б = 0,014 м r _н = 0,034 м ε = 0,309
2	75	0,0191	2,31	1070	88	185	949	85,8	
3a	100	0,0221	2,67	1230	115	250	1320	89,6	
3б	100	0,0221	2,67	1230	115	245	1270	86,3	
4	125	0,0247	2,98	1380	148	315	1630	88,7	
4a	150	0,0271	3,26	1510	180	385	2000	90,7	
4б	150	0,0271	3,26	1510	180	360	1760	79,6	
5a	180	0,0297	3,58	1650	210	400	1860	70,1	
5б	180	0,0297	3,58	1650	210	439	2240	84,4	
6	50	0,0156	1,68	774	85	170	831	102	
7	75	0,0191	2,05	948	125	255	1270	104	
8	100	0,0221	2,37	1090	170	320	1470	90,1	
9	125	0,0247	2,67	1220	210	415	2000	98,5	
10	150	0,0271	2,90	1340	245	500	2490	102	
11	180	0,0297	3,18	1470	260	540	2740	93,4	

№	h, мм	G _v , м ³ /с	U, м/с	Re	H ₀ , мм	H, мм	Δp, Па	ξ	Условия
12a	50	0,0156	1,31	606	60	129	675	72,3	d _ш = 0,007 м r _б = 0,014 м r _н = 0,055 м ε = 0,309
12б	50	0,0156	1,31	606	60	130	685	73,3	
13	75	0,0191	1,61	742	88	190	998	71,2	
14a	100	0,0221	1,85	857	115	255	1370	73,3	
14б	100	0,0221	1,85	857	115	245	1270	68,1	
15	125	0,0247	2,07	958	148	325	1730	74,2	
16a	150	0,0271	2,27	1050	180	360	1760	62,8	
16б	150	0,0271	2,27	1050	180	380	1960	69,8	
17a	180	0,0297	2,49	1150	210	450	2350	69,8	
17б	180	0,0297	2,49	1150	210	420	2050	61,1	
18	50	0,0156	0,79	367	65	140	734	68,1	d _ш = 0,007 м r _б = 0,014 м r _н = 0,1 м ε = 0,310
19	75	0,0191	0,97	449	93	210	1140	70,8	
20	100	0,0221	1,12	519	120	280	1570	72,6	
21	125	0,0247	1,25	580	158	345	1830	67,9	
22a	150	0,0271	1,37	635	195	425	2250	69,6	
22б	150	0,0271	1,37	635	195	420	2200	68,1	
23a	180	0,0297	1,51	696	265	475	2050	53,0	
23б	180	0,0297	1,51	696	235	495	2540	65,6	
24	50	0,0156	1,88	1870	60	65	49	14,2	d _ш = 0,015 м
25	100	0,0221	2,67	2640	115	135	196	28,4	r _б = 0,014 м
26	150	0,0271	3,26	3230	180	200	196	19,0	r _н = 0,034 м
27	200	0,0313	3,77	3730	210	270	587	42,7	ε = 0,361

№	h, мм	G _v , м ³ /с	U, м/с	Re	Н ₀ , мм	Н, мм	Δр, Па	ξ	Условия
28	50	0,0156	1,68	1660	85	110	245	64,3	d _ш = 0,015 м r _Б = 0,014 м r _Н = 0,04 м ε = 0,361
29	75	0,0191	2,05	2030	125	165	391	68,6	
30	100	0,0221	2,37	2350	170	215	440	57,9	
31	125	0,0247	2,65	2620	210	260	489	51,5	
32	150	0,0271	2,90	2870	245	300	538	47,2	
33	180	0,0297	3,18	3150	260	330	685	50,0	
34	50	0,0156	1,31	1300	60	75	147	33,7	d _ш = 0,015 м r _Б = 0,014 м r _Н = 0,055 м ε = 0,361
35	100	0,0221	1,85	1840	115	150	342	39,3	
36	150	0,0271	2,27	2250	180	220	391	29,9	
37	200	0,0313	2,62	2600	210	290	782	44,9	
38	50	0,0156	0,79	786	65	80	147	29,2	
39	100	0,0221	1,12	1110	120	170	489	48,6	d _ш = 0,015 м r _Б = 0,014 м r _Н = 0,1 м ε = 0,399
40	150	0,0271	1,37	1360	195	255	587	38,9	
41	200	0,0313	1,59	1570	265	335	685	34,0	
42	50	0,0156	0,79	1310	65	75	98	32,4	
43	75	0,0191	0,97	1604	93	110	166	36,7	d _ш = 0,025 м r _Б = 0,014 м r _Н = 0,1 м ε = 0,443
44	100	0,0221	1,12	1852	120	155	342	56,7	
45	125	0,0247	1,25	2071	158	190	313	41,5	
46	150	0,0271	1,37	2268	195	230	342	37,8	
47	180	0,0297	1,51	2485	235	300	636	58,5	

Приложение Г

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПУЛЬСАЦИЙ СТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ

Результаты измерений относительной энергии пульсационного давления приведены в таблице Г.1.

Таблица Г.1. Сводные результаты измерений относительной энергии пульсационного давления в шаровой засыпке при радиальной схеме течения

№ п/п	Re	$\sqrt{p^2}$, Па	η	№ п/п	Re	$\sqrt{p^2}$, Па	η
$d_{ш} = 15$ мм; $r = 18$ мм; $\varepsilon=0,40$				$d_{ш} = 15$ мм; $r = 53$ мм; $\varepsilon=0,40$			
1	2801,8	2,864	0,095	7	845,8	1,864	0,681
2	3962,4	5,304	0,088	8	1196,2	3,084	0,563
3	4852,9	6,664	0,074	9	1465,0	3,824	0,466
4	3144,0	3,240	0,086	10	1028,9	2,140	0,528
5	5740,1	7,820	0,062	11	1878,6	4,860	0,360
6	7260,7	9,300	0,046	12	2376,2	5,700	0,264
$d_{ш} = 15$ мм; $r = 75$ мм; $\varepsilon=0,40$				$d_{ш} = 15$ мм; $r = 90$ мм; $\varepsilon=0,40$			
13	597,7	1,244	0,91	19	498,1	0,664	0,70
14	845,3	2,304	0,843	20	704,4	1,284	0,676
15	1035,3	3,104	0,757	21	862,7	1,644	0,577
16	754,6	2,170	0,996				
17	1377,6	4,740	0,653				
18	1742,6	6,320	0,544				

№ п/п	Re	$\sqrt{p^2}$, Па	η	№ п/п	Re	$\sqrt{p^2}$, Па	η
$d_{uu} = 7$ мм; $r = 18$ мм; $\varepsilon=0,31$				$d_{uu} = 7$ мм; $r = 55$ мм; $\varepsilon=0,31$			
22	1214	1,154	0,023	26	366,5	0,939	0,206
23	1717	1,960	0,02	27	518,4	2,390	0,262
24	2103	2,592	0,017	28	634,9	3,068	0,224
25	2304	2,844	0,016	29	695,4	3,550	0,216
$d_{uu} = 7$ мм; $r = 90$ мм; $\varepsilon=0,31$							
30	215,8	0,660	0,418				
31	305,3	1,772	0,561				
32	373,9	2,710	0,572				
33	409,5	2,730	0,480				

Таблица Г.2. Сводные результаты исследований пульсаций статического давления в шаровой засыпке при осевой схеме течения

Re	960	1100	1700	3200	4100	4700
η	0,2	0,23	0,2	0,14	0,09	0,08

Приложение Д

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ РАДИАЛЬНОМ ТЕЧЕНИИ ГАЗА В ШАРОВОЙ ЗАСЫПКЕ

Результаты измерений коэффициента теплоотдачи приведены в таблице Д.1.

Таблица Д.1 – Результаты исследований коэффициента теплоотдачи при радиальном течении газа в шаровой засыпке

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
1	50	0,0202	3,247	1	0,803	138,2	d _ш = 0,007 м r = 0,018 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,675	171,7	
				3	0,544	135,2	
				4	0,459	234,2	
				5	0,342	93,75	
				6	0,304		
1а	50	0,0202	3,247	1	0,434	320,9	d _ш = 0,007 м r = 0,018 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,290	448,9	
				3	0,165	671,2	
				4	0,071	456,7	
				5	0,040	635,7	
				6	0,018		
1б	50	0,0202	3,247	1	0,431	277,9	d _ш = 0,007 м r = 0,018 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,304	365,8	
				3	0,192	457,9	
				4	0,108	1046,6	
				5	0,029		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
2	100	0,0285	4,593	1	0,609	392,3	d _ш = 0,007 м r = 0,018 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,372	362,2	
				3	0,236	344,9	
				4	0,153	413,5	
				5	0,091	386,4	
				6	0,056		
2а	100	0,0285	4,593	1	0,820	392,1	d _ш = 0,007 м r = 0,018 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,501	416,2	
				3	0,297	570,7	
				4	0,145	568,4	
				5	0,071	586,1	
				6	0,034		
3	150	0,0350	5,624	1	0,603	390,9	d _ш = 0,007 м r = 0,018 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,369	475,7	
				3	0,203	612,8	
				4	0,094	534,9	
				5	0,048	737,7	
				6	0,019		
3а				1	0,396	304,8	d _ш = 0,007 м r = 0,018 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,270	288,1	
				3	0,188	305,9	
				4	0,128	404,5	
				5	0,077	376,1	
				6	0,048		
4	50	0,0202	1,169	1	0,565	172,3	d _ш = 0,007 м r = 0,05 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,455	188,6	
				3	0,359	156,3	
				4	0,295	170,9	
				5	0,238	166,8	
				6	0,193		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
4а	50	0,0202	1,169	1	0,587	211,5	d _ш = 0,007 м r = 0,05 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,45	153,7	
				3	0,371	204,3	
				4	0,287	190,2	
				5	0,226	295,0	
				6	0,156		
4б	50	0,0202	1,169	1	1,125	224,0	d _ш = 0,007 м r = 0,05 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,849	250,2	
				3	0,620	157,0	
				4	0,509	172,2	
				5	0,410	156,0	
				6	0,337		
5	100	0,0286	1,653	1	0,574	165,9	d _ш = 0,007 м r = 0,05 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,466	177,2	
				3	0,373	203,1	
				4	0,289	195,7	
				5	0,226	203,6	
				6	0,175		
5а	100	0,0286	1,653	1	0,553	129,4433	d _ш = 0,007 м r = 0,05 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,47	171,2879	
				3	0,379	370,3331	
				4	0,238	791,9282	
				5	0,088	331,8311	
				6	0,058		
5б	100	0,0286	1,653	1	0,888	310,7	d _ш = 0,007 м r = 0,05 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,601	358,6	
				3	0,383	352,4	
				4	0,246	313,1	
				5	0,166	387,6	
				6	0,102		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
6	150	0,0350	2,025	1	0,73	280,8	d _ш = 0,007 м r = 0,05 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,513	270,9	
				3	0,365	323,8	
				4	0,243	270,4	
				5	0,173	339,0	
				6	0,113		
6а	150	0,0350	2,025	1	0,597	332,8	d _ш = 0,007 м r = 0,05 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,393	344,3	
				3	0,255	406,6	
				4	0,153	307,3	
				5	0,104	740,9	
				6	0,041		
6б	150	0,0350	2,025	1	0,790	286,8	d _ш = 0,007 м r = 0,05 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,551	197,4	
				3	0,430	193,9	
				4	0,337	218,8	
				5	0,256	200,5	
				6	0,199		
7	50	0,0202	0,650	1	0,854	121,6112	d _ш = 0,007 м r = 0,09 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,733	171,394	
				3	0,591	160,6244	
				4	0,483	197,2163	
				5	0,377	214,34	
				6	0,288		
7а	50	0,0202	0,650	1	0,502	223,7	d _ш = 0,007 м r = 0,09 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,379	240,9	
				3	0,28	177,6	
				4	0,224	272,8	
				5	0,159	418,4	
				6	0,094		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
76	50	0,0202	0,650	1	1,038	146,0	d _{III} = 0,007 м r = 0,09 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,864	132,0	
				3	0,732	105,7	
				4	0,641	168,0	
				5	0,519	325,0	
				6	0,345		
8	100	0,0286	0,919	1	0,72	240,9	d _{III} = 0,007 м r = 0,09 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,532	269,9	
				3	0,379	266,9	
				4	0,271	274,3	
				5	0,192	234,5	
				6	0,143		
8a	100	0,0286	0,919	1	0,513	142,3	d _{III} = 0,007 м r = 0,09 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,429	166,6	
				3	0,348	272,9	
				4	0,247	517,0	
				5	0,129	583,2	
				6	0,062		
86	100	0,0286	0,919	1	0,706	277,8	d _{III} = 0,007 м r = 0,09 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,498	653,9	
				3	0,219	505,8	
				4	0,116	753,7	
				5	0,045	569,6	
				6	0,022		
9	150	0,0350	1,125	1	0,716	324,9	d _{III} = 0,007 м r = 0,09 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,476	242,5	
				3	0,351	289,4	
				4	0,244	335,8	
				5	0,16	249,1	
				6	0,117		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
9а	150	0,0350	1,125	1	0,332	327,5	d _{III} = 0,007 м r = 0,09 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,22	371,2	
				3	0,138	248,4	
				4	0,101	165,9	
				5	0,082	184,9	
				6	0,065		
9б	150	0,0350	1,125	1	0,413	472,9	d _{III} = 0,007 м r = 0,09 м ε = 0,310 Δτ = 5 с
				2	0,228	307,2	
				3	0,155	325,3	
				4	0,103	404,0	
				5	0,062	551,7	
				6	0,031		
10	50	0,0202	3,247	1	1,828	146,8	d _{III} = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,539	181,5	
				3	1,244	193,0	
				4	0,992	201,8	
				5	0,783	156,1	
				6	0,652		
10а	50	0,0202	3,247	1	2,009	285,2	d _{III} = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,438	204,8	
				3	1,131	225,7	
				4	0,868	234,9	
				5	0,659	202,0	
				6	0,520		
10б	50	0,0202	3,247	1	2,046	218,8	d _{III} = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,583	200,0	
				3	1,252	168,1	
				4	1,028	182,4	
				5	0,830	181,4	
				6	0,671		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
10В	50	0,0202	3,247	1	1,625	155,6	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,354	171,8	
				3	1,107	166,2	
				4	0,911	201,9	
				5	0,719	220,8	
				6	0,555	141,8	
				7	0,470		
11	50	0,0202	3,247	1	1,565	162,5	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,176	146,4	
				3	0,909	152,7	
				4	0,695	151,9	
				5	0,532	148,1	
				6	0,410	162,6	
				7	0,308	163,6	
				8	0,231		
11а	50	0,0202	3,247	1	2,023	196,4	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,432	174,8	
				3	1,053	142,9	
				4	0,819	145,5	
				5	0,634	147,6	
				6	0,489	143,4	
				7	0,380	125,0	
				8	0,305		
12	100	0,0286	4,592	1	2,020	161,8	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,671	119,8	
				3	1,452	156,2	
				4	1,209	154,2	
				5	1,009	207,6	
				6	0,791		
12а	100	0,0286	4,592	1	1,982	241,0	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,494	238,1	
				3	1,130	282,9	
				4	0,811	309,8	
				5	0,564	278,2	
				6	0,407		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
12б	100	0,0286	4,592	1	1,907	22709	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,460	214,0	
				3	1,136	198,6	
				4	0,900	185,6	
				5	0,724	180,3	
				6	0,586		
12в	100	0,0286	4,592	1	2,049	194,6	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,631	186,9	
				3	1,310	210,1	
				4	1,024	266,7	
				5	0,749	196,3	
				6	0,595	288,9	
				7	0,424		
13	100	0,0286	4,592	1	1,392	163,6	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,044	157,8	
				3	0,791	179,3	
				4	0,577	148,9	
				5	0,444	166,9	
				6	0,331	150,5	
				7	0,254	150,3	
				8	0,195		
13а	100	0,0286	4,592	1	1,607	166,5	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,199	171,4	
				3	0,887	162,1	
				4	0,667	167,3	
				5	0,497	151,1	
				6	0,381	175,1	
				7	0,280	134,5	
				8	0,221		
14	150	0,0350	5,624	1	1,391	272,9	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,010	299,4	
				3	0,711	278,4	
				4	0,513	311,6	
				5	0,356	301,4	
				6	0,250		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
14а	150	0,0350	5,624	1	2,026	250,1	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,511	184,5	
				3	1,271	189,0	
				4	0,975	189,2	
				5	0,781	181,9	
				6	0,631		
14б	150	0,0350	5,624	1	1,851	229,7	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,414	261,9	
				3	1,040	256,3	
				4	0,770	276,2	
				5	0,557	191,5	
				6	0,445		
14в	150	0,0350	5,624	1	1,576	212,9	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,229	205,8	
				3	0,966	202,9	
				4	0,761	211,3	
				5	0,594	195,2	
				6	0,473	218,9	
				7	0,366		
15	150	0,0350	5,624	1	1,503	167,7	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,119	183,7	
				3	0,810	168,7	
				4	0,602	174,4	
				5	0,443	176,1	
				6	0,325	201,5	
				7	0,228	147,2	
				8	0,176		
15а	150	0,0350	5,624	1	1,267	143,1	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	0,985	148,2	
				3	0,759	127,1	
				4	0,607	131,1	
				5	0,482	123,3	
				6	0,388	138,7	
				7	0,304	146,3	
				8	0,235		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
16	50	0,0202	1,670	1	2,246	177,0	d _ш = 0,015 м r = 0,035 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,825	190,3	
				3	1,460	146,2	
				4	1,230	131,7	
				5	1,054	135,7	
				6	0,899		
17	100	0,0286	2,236	1	2,082	203,5	d _ш = 0,015 м r = 0,035 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,640	149,1	
				3	1,377	124,4	
				4	1,190	139,9	
				5	1,010	138,1	
				6	0,859		
18	150	0,0350	2,893	1	1,806	147,0	d _ш = 0,015 м r = 0,035 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,520	141,2	
				3	1,288	156,5	
				4	1,072	200,9	
				5	0,847	263,3	
				6	0,622		
19	50	0,0202	1,169	1	1,890	84,5	d _ш = 0,015 м r = 0,050 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,629	90,2	
				3	1,390	89,2	
				4	1,188	81,1	
				5	1,030	81,1	
				6	0,893	80,6	
				7	0,775	81,1	
				8	0,672		
19a	50	0,0202	1,169	1	2,270	71,1	d _ш = 0,015 м r = 0,050 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	2,003	89,9	
				3	1,710	115,8	
				4	1,395	69,7	
				5	1,234	74,2	
				6	1,083	76,3	
				7	0,947	61,4	
				8	0,850		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
20	100	0,0286	1,653	1	1,719	96,8	d _ш = 0,015 м r = 0,050 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,450	101,9	
				3	1,212	91,4	
				4	1,032	112,9	
				5	0,846	93,3	
				6	0,718	91,7	
				7	0,611	96,0	
				8	0,516		
20a	100	0,0286	1,653	1	2,097	99,6	d _ш = 0,015 м r = 0,050 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,760	150,8	
				3	1,350	85,7	
				4	1,161	91,2	
				5	0,989	89,5	
				6	0,845	82,4	
				7	0,731	93,6	
				8	0,620		
21	150	0,0350	2,025	1	1,547	128,1	d _ш = 0,015 м r = 0,050 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,235	95,5	
				3	1,044	117,5	
				4	0,849	118,7	
				5	0,689	108,8	
				6	0,569	94,3	
				7	0,482	138,2	
				8	0,378		
21a	150	0,0350	2,025	1	1,723	108,0	d _ш = 0,015 м r = 0,050 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,425	115,5	
				3	1,163	113,2	
				4	0,953	109,5	
				5	0,786	103,7	
				6	0,655	121,5	
				7	0,529	111,2	
				8	0,435		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
22	50	0,0202	1,124	1	1,610	62,7	d _ш = 0,015 м r = 0,052 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,442	72,7	
				3	1,269	72,5	
				4	1,117	75,0	
				5	0,979	81,7	
				6	0,848	79,8	
				7	0,737	85,6	
				8	0,634	75,7	
				9	0,555		
23	125	0,0319	1,777	1	1,800	99,9	d _ш = 0,015 м r = 0,052 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,510	97,9	
				3	1,271	86,3	
				4	1,092	92,5	
				5	0,928	90,1	
				6	0,792	99,3	
				7	0,665	99,7	
				8	0,558	102,4	
				9	0,466		
24	50	0,0202	1,103	1	2,020	161,8	d _ш = 0,015 м r = 0,053 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,671	119,8	
				3	1,452	156,2	
				4	1,209	154,2	
				5	1,009	207,6	
				6	0,791		
24a	50	0,0202	1,103	1	2,328	179,6	d _ш = 0,015 м r = 0,053 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,886	150,4	
				3	1,581	120,9	
				4	1,372	119,9	
				5	1,192	109,8	
				6	1,048		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
25	100	0,0286	1,560	1	2,168	115,7	d _ш = 0,015 м r = 0,053 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,893	130,0	
				3	1,626	131,9	
				4	1,393	144,4	
				5	1,176	179,3	
				6	0,953		
26	150	0,0350	1,910	1	2,197	125,2	d _ш = 0,015 м r = 0,053 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,897	134,1	
				3	1,621	133,6	
				4	1,386	106,0	
				5	1,224	119,5	
				6	1,064		
26a	150	0,0350	1,910	1	2,196	140,2	d _ш = 0,015 м r = 0,053 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,863	131,4	
				3	1,597	199,4	
				4	1,264	234,6	
				5	0,960	152,3	
				6	0,803		
27	50	0,0202	1,063	1	2,103	117,2	d _ш = 0,015 м r = 0,055 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,833	120,6	
				3	1,591	96,4	
				4	1,421	99,2	
				5	1,265	109,9	
				6	1,112		
27a	50	0,0202	1,063	1	2,139	83,7	d _ш = 0,015 м r = 0,055 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,939	87,5	
				3	1,750	88,2	
				4	1,578	82,8	
				5	1,432	85,1	
				6	1,296	80,7	
				7	1,179		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
28	100	0,0286	1,503	1	2,071	204,2	d _ш = 0,015 м r = 0,055 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,630	145,1	
				3	1,375	132,6	
				4	1,177	126,3	
				5	1,015	115,0	
				6	0,887		
28a	100	0,0286	1,503	1	1,851	106,9	d _ш = 0,015 м r = 0,055 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,633	98,4	
				3	1,455	101,9	
				4	1,291	106,8	
				5	1,139	102,5	
				6	1,010	105,0	
				7	0,893		
29	150	0,0350	1,840	1	1,959	141,2	d _ш = 0,015 м r = 0,055 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,660	121,8	
				3	1,439	121,4	
				4	1,248	138,4	
				5	1,061	227,1	
				6	0,813		
29a	150	0,0350	1,840	1	1,980	103,8	d _ш = 0,015 м r = 0,055 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,753	126,7	
				3	1,511	130,2	
				4	1,297	156,1	
				5	1,080	113,9	
				6	0,945	125,2	
				7	0,816		
30	50	0,0202	0,779	1	2,148	137,6	d _ш = 0,015 м r = 0,075 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,828	132,4	
				3	1,565	90,2	
				4	1,408	82,6	
				5	1,278	90,0	
				6	1,150		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
30а	50	0,0202	0,779	1	2,154	71,4	d _ш = 0,015 м r = 0,075 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,981	78,9	
				3	1,806	71,9	
				4	1,660	74,0	
				5	1,522	73,7	
				6	1,396	87,4	
				7	1,260		
31	100	0,0286	1,103	1	2,197	125,2	d _ш = 0,015 м r = 0,075 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,897	134,1	
				3	1,621	133,6	
				4	1,386	106,0	
				5	1,224	119,5	
				6	1,064		
31а	100	0,0286	1,103	1	2,321	161,3	d _ш = 0,015 м r = 0,075 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,921	160,2	
				3	1,592	157,8	
				4	1,323	150,5	
				5	1,109	133,8	
				6	0,948	133,1	
				7	0,811		
32	150	0,0350	1,350	1	2,074	161,1	d _ш = 0,015 м r = 0,075 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,717	145,3	
				3	1,448	124,8	
				4	1,251	120,6	
				5	1,086	112,3	
				6	0,952		
32а	150	0,0350	1,350	1	1,264	176,3	d _ш = 0,015 м r = 0,075 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,028	155,2	
				3	0,857	153,4	
				4	0,716	152,3	
				5	0,599	167,9	
				6	0,492	146,3	
				7	0,414		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
33	50	0,0202	0,649	1	2,061	137,1	d _{III} = 0,015 м r = 0,090 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,755	148,2	
				3	1,475	211,5	
				4	1,151	177,2	
				5	0,935	134,1	
				6	0,799		
33a	50	0,0202	0,649	1	2,134	95,0	d _{III} = 0,015 м r = 0,090 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,909	80,5	
				3	1,737	89,5	
				4	1,564	66,9	
				5	1,446	90,1	
				6	1,301		
34	100	0,0286	0,919	1	2,036	149,3	d _{III} = 0,015 м r = 0,090 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,709	151,4	
				3	1,431	131,9	
				4	1,226	156,9	
				5	1,020	180,9	
				6	0,825		
34a	100	0,0286	0,919	1	1,920	181,5	d _{III} = 0,015 м r = 0,090 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,552	215,8	
				3	1,205	125,6	
				4	1,040	144,4	
				5	0,878	145,8	
				6	0,740		
35	150	0,0350	1,125	1	2,048	206,8	d _{III} = 0,015 м r = 0,090 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,607	149,2	
				3	1,349	131,7	
				4	1,156	139,9	
				5	0,981	135,4	
				6	0,837		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
35а	150	0,0350	1,125	1	1,718	226,7	d _ш = 0,015 м r = 0,090 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,317	222,9	
				3	1,014	313,6	
				4	0,702	205,0	
				5	0,552	187,6	
				6	0,443		
36	50	0,0202	0,649	1	1,758	110,7	d _ш = 0,015 м r = 0,090 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,447	94,7	
				3	1,225	105,2	
				4	1,018	99,8	
				5	0,854	100,2	
				6	0,716	106,2	
				7	0,594	100,2	
				8	0,498		
36а	50	0,0202	0,649	1	2,360	66,1	d _ш = 0,015 м r = 0,090 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	2,101	75,1	
				3	1,841	71,7	
				4	1,623	103,4	
				5	1,353	119,2	
				6	1,097	78,8	
				7	0,955	66,9	
				8	0,849		
37	100	0,0286	0,919	1	1,586	173,0	d _ш = 0,015 м r = 0,090 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,170	137,9	
				3	0,918	152,5	
				4	0,702	150,2	
				5	0,539	145,9	
				6	0,417	131,3	
				7	0,331	148,3	
				8	0,255		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
37a	100	0,0286	0,919	1	1,477	118,1	d _ш = 0,015 м r = 0,090 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,200	124,5	
				3	0,964	114,6	
				4	0,788	130,8	
				5	0,626	105,5	
				6	0,520	129,6	
				7	0,414	113,6	
				8	0,339		
38	150	0,0350	1,125	1	1,268	124,9	d _ш = 0,015 м r = 0,090 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	1,018	152,9	
				3	0,778	129,9	
				4	0,619	137,5	
				5	0,486	151,9	
				6	0,372	111,0	
				7	0,306	142,9	
				8	0,238		
38a	150	0,0350	1,125	1	1,296	171,2	d _ш = 0,015 м r = 0,090 м ε = 0,399 Δτ = 15 с
				2	0,959	156,7	
				3	0,728	183,7	
				4	0,527	179,9	
				5	0,384	146,1	
				6	0,297	170,6	
				7	0,220	160,1	
				8	0,166		
39	60	0,0221	3,557	1	1,868	277,6	d _ш = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,349	319,9	
				3	0,927	228,6	
				4	0,709	229,1	
				5	0,542	246,4	
				6	0,406		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
40	200	0,0404	6,495	1	1,335	311,0	d _{III} = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	0,927	328,0	
				3	0,631	345,1	
				4	0,421	353,9	
				5	0,278	311,2	
				6	0,193		
41	290	0,0486	7,821	1	1,407	340,3	d _{III} = 0,015 м r = 0,018 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	0,944	338,1	
				3	0,635	286,1	
				4	0,454	333,7	
				5	0,307	365,5	
				6	0,200		
42	60	0,0221	1,164	1	2,160	140,9	d _{III} = 0,015 м r = 0,055 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,831	182,1	
				3	1,479	158,6	
				4	1,228	123,1	
				5	1,063	130,7	
				6	0,912		
43	200	0,0404	2,126	1	1,965	230,9	d _{III} = 0,015 м r = 0,055 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,499	205,5	
				3	1,178	199,8	
				4	0,932	215,4	
				5	0,724	180,3	
				6	0,586		
44	290	0,0486	2,560	1	1,755	192,7	d _{III} = 0,015 м r = 0,055 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,400	208,0	
				3	1,097	191,9	
				4	0,876	265,0	
				5	0,642	289,9	
				6	0,457		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
45	60	0,0221	0,854	1	1,996	176,4	d _{III} = 0,015 м r = 0,075 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,623	133,4	
				3	1,388	130,5	
				4	1,191	108,2	
				5	1,049	127,8	
				6	0,903		
46	200	0,0404	1,559	1	1,929	190,4	d _{III} = 0,015 м r = 0,075 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,543	206,6	
				3	1,211	219,7	
				4	0,936	245,3	
				5	0,702	239,7	
				6	0,530		
47	290	0,0486	1,877	1	1,832	257,2	d _{III} = 0,015 м r = 0,075 м ε = 0,399 Δτ = 10 с
				2	1,355	218,3	
				3	1,049	199,7	
				4	0,830	239,2	
				5	0,627	240,4	
				6	0,473		
48	50	0,0202	3,247	1	1,942	85,9	d _{III} = 0,025 м r = 0,018 м ε = 0,44 Δτ = 30 с
				2	1,620	81,1	
				3	1,365	80,8	
				4	1,151	78,1	
				5	0,976	81,4	
				6	0,822		
49	100	0,0286	4,593	1	1,938	130,9	d _{III} = 0,025 м r = 0,018 м ε = 0,44 Δτ = 30 с
				2	1,470	121,3	
				3	1,138	154,1	
				4	0,822	91,2	
				5	0,678	120,3	
				6	0,526		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
50	150	0,0350	5,625	1	1,864	138,7	d _{III} = 0,025 м r = 0,018 м ε = 0,44 Δτ = 30 с
				2	1,391	143,7	
				3	1,027	133,9	
				4	0,774	136,7	
				5	0,580	133,0	
				6	0,438		
51	50	0,0202	1,169	1	2,161	68,8	d _{III} = 0,025 м r = 0,050 м ε = 0,44 Δτ = 30 с
				2	1,869	69,5	
				3	1,614	66,0	
				4	1,404	71,6	
				5	1,207	64,7	
				6	1,053		
52	100	0,0286	1,653	1	2,098	100,2	d _{III} = 0,025 м r = 0,050 м ε = 0,44 Δτ = 30 с
				2	1,698	91,1	
				3	1,401	83,8	
				4	2,174	92,4	
				5	0,966	88,7	
				6	0,801		
53	150	0,0350	2,025	1	2,183	137,2	d _{III} = 0,025 м r = 0,050 м ε = 0,44 Δτ = 30 с
				2	1,634	97,5	
				3	1,330	92,1	
				4	1,095	97,1	
				5	0,892	93,0	
				6	0,733		
54	50	0,0202	0,650	1	2,049	98,0	d _{III} = 0,025 м r = 0,090 м ε = 0,44 Δτ = 30 с
				2	1,666	105,3	
				3	1,334	100,9	
				4	1,078	94,0	
				5	0,884	95,9	
				6	0,722		

№ опыта	h, мм	G _v , м ³ /с	U _r , м/с	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	Условия
55	100	0,0286	0,919	1	1,861	125,8	d _{III} = 0,025 м r = 0,090 м ε = 0,44 Δτ = 30 с
				2	1,427	117,3	
				3	1,114	122,1	
				4	0,861	105,6	
				5	0,689	131,5	
				6	0,522		
56	150	0,0350	1,125	1	1,869	152,0	d _{III} = 0,025 м r = 0,090 м ε = 0,44 Δτ = 30 с
				2	1,356	129,4	
				3	1,032	130,8	
				4	0,783	132,5	
				5	0,592	123,7	
				6	0,456		
57	50	0,0202	3,247	1	2,027	134,7	d _{III} = 0,025 м r = 0,018 м ε = 0,44 Δτ = 20 с
				2	1,677	124,8	
				3	1,407	129,9	
				4	1,172	129,3	
				5	0,977	120,2	
				6	0,825		
58	100	0,0286	4,593	1	2,014	171,6	d _{III} = 0,025 м r = 0,018 м ε = 0,44 Δτ = 20 с
				2	1,582	153,9	
				3	1,274	172,1	
				4	1,000	164,8	
				5	0,793	164,7	
				6	0,629		
59	50	0,0202	1,169	1	2,442	96,1	d _{III} = 0,025 м r = 0,050 м ε = 0,44 Δτ = 20 с
				2	2,133	87,5	
				3	1,886	97,6	
				4	1,644	96,6	
				5	1,435	96,3	
				6	1,253		

№ опыта	h, мм	Gv, м ³ /с	Ur, м/с	i	Ei, мВ	αi, Вт/(м ² ·К)	Условия
60	100	0,0286	1,653	1	2,235	123,3	d _ш = 0,025 м r = 0,050 м ε = 0,44 Δτ = 20 с
				2	1,897	103,6	
				3	1,624	129,2	
				4	1,354	105,6	
				5	1,167	106,9	
				6	1,004		
61	50	0,0202	0,650	1	2,176	113,4	d _ш = 0,025 м r = 0,090 м ε = 0,44 Δτ = 20 с
				2	1,855	108,7	
				3	1,592	100,5	
				4	1,382	112,9	
				5	1,179	105,7	
				6	1,016		
62	100	0,0286	0,919	1	1,997	128,4	d _ш = 0,025 м r = 0,090 м ε = 0,44 Δτ = 20 с
				2	1,667	113,0	
				3	1,422	128,4	
				4	1,187	111,3	
				5	1,015	116,9	
				6	0,861		

В таблице Д.2 приведены результаты аналогичного исследования на установке с осевым течением газового теплоносителя.

Таблица Д.2 – Результаты исследований коэффициента теплоотдачи при осевом течении газа в шаровой засыпке

№	h, мм	Gv, м ³ /с	U, м/с	Re	i	Ei, мВ	αi, Вт/(м ² ·К)	α, Вт/(м ² ·К)	Nu
1	20	0,0051 0	0,810	790	1	2,296	100,8	94,8	54,7
					2	2,040	109,1		
					3	1,795	100,2		
					4	1,596	78,9		
					5	1,455	84,9		
					6	1,317			

№	h, мм	Gv, м ³ /с	U, м/с	Re	i	E _i , мВ	α _i , Вт/(м ² ·К)	α, Вт/(м ² ·К)	Nu
2	100	0,0114	1,810	1750	1	2,056	211,2	145,7	84,1
					2	1,605	157,1		
					3	1,335	141,4		
					4	1,131	102,4		
					5	1,003	116,4		
					6	0,875			
3	200	0,0161	2,559	2480	1	1,742	155,9	162,0	93,4
					2	1,451	179,2		
					3	1,176	177,5		
					4	0,955	166,1		
					5	0,786	131,1		
					6	0,674			
4	350	0,0213	3,385	3280	1	1,626	170,1	184,6	106, 5
					2	1,332	190,8		
					3	1,065	202,4		
					4	0,84	196,7		
					5	0,667	162,9		
					6	0,551			
5	500	0,0255	4,046	3920	1	1,394	205,1	211,2	121,9
					2	1,096	233,0		
					3	0,834	208,6		
					4	0,653	214,1		
					5	0,508	195,4		
					6	0,404			
6	600	0,0279	4,432	4290	1	1,529	257,9	247,2	142,6
					2	1,13	220,1		
					3	0,873	245,0		
					4	0,655	228,6		
					5	0,501	284,2		
					6	0,359			
7	800	0,0322	5,118	4950	1	1,589	253,1	237,0	136,7
					2	1,181	216,7		
					3	0,916	234,2		
					4	0,696	250,3		
					5	0,519	230,7		
					6	0,396			

Усредненные значения коэффициента теплоотдачи, а также значения Re_r и Nu_r приведены в таблице Д.3.

Таблица Д.3 – Усредненные результаты исследований коэффициента теплоотдачи при радиальном течении газа в шаровой засыпке

№ опыта	$d_{ш}, м$	$r, м$	U_r	Re_r	$\alpha, Вт/(м^2 \cdot К)$	Nu_r
1	0,007	0,018	3,247	1470	154,6	41,6
1а	0,007	0,018	3,247	1470	506,7	136,4
1б	0,007	0,018	3,247	1470	537,0	144,6
2	0,007	0,018	4,593	2070	379,9	102,3
2а	0,007	0,018	4,593	2070	506,7	136,4
3	0,007	0,018	5,624	2540	550,4	148,2
3а	0,007	0,018	5,624	2540	335,9	90,4
4	0,007	0,050	1,169	530	171,0	46,0
4а	0,007	0,050	1,169	530	211,0	56,8
4б	0,007	0,050	1,169	530	191,9	51,7
5	0,007	0,050	1,653	750	189,1	50,9
5а	0,007	0,050	1,653	750	358,9	96,6
5б	0,007	0,050	1,653	750	344,5	92,7
6	0,007	0,050	2,025	910	297,0	80,0
6а	0,007	0,050	2,025	910	426,4	114,8
6б	0,007	0,050	2,025	910	219,5	59,1
7	0,007	0,090	0,650	290	173,0	46,6
7а	0,007	0,090	0,650	290	266,7	71,8
7б	0,007	0,090	0,650	290	175,4	47,2
8	0,007	0,090	0,919	415	257,3	69,3
8а	0,007	0,090	0,919	415	336,4	90,6
8б	0,007	0,090	0,919	415	552,2	174,6
9	0,007	0,090	1,125	510	288,4	77,6
9а	0,007	0,090	1,125	510	259,6	69,9
9б	0,007	0,090	1,125	510	412,2	110,9
10	0,015	0,018	3,247	3140	175,8	101,4
10а	0,015	0,018	3,247	3140	230,5	133,0
10б	0,015	0,018	3,247	3140	190,2	109,7
10в	0,015	0,018	3,247	3140	176,3	101,7

№ опыта	$d_{ин}, м$	$r, м$	U_r	Re_r	$\alpha, Вт/(м^2 \cdot К)$	Nu_r
11	0,015	0,018	3,247	3140	155,4	89,6
11а	0,015	0,018	3,247	3140	153,7	88,7
12	0,015	0,018	4,592	4440	159,9	92,3
12а	0,015	0,018	4,592	4440	270,0	155,8
12б	0,015	0,018	4,592	4440	201,3	116,1
12в	0,015	0,018	4,592	4440	223,9	129,2
13	0,015	0,018	4,592	4440	159,6	92,1
13а	0,015	0,018	4,592	4440	161,1	93,0
14	0,015	0,018	5,625	5440	292,7	168,9
14а	0,015	0,018	5,625	5440	199,0	114,8
14б	0,015	0,018	5,625	5440	243,1	140,3
14в	0,015	0,018	5,625	5440	207,8	119,9
15	0,015	0,018	5,625	5440	174,2	100,5
15а	0,015	0,018	5,625	5440	136,8	78,9
16	0,015	0,035	1,670	1620	156,2	90,1
17	0,015	0,035	2,362	2290	151,0	87,1
18	0,015	0,035	2,893	2800	181,8	104,9
19	0,015	0,050	1,169	1130	84,0	48,5
19а	0,015	0,050	1,169	1130	79,8	46,0
20	0,015	0,050	1,653	1600	97,7	56,4
20а	0,015	0,050	1,653	1600	98,9	57,1
21	0,015	0,050	2,025	1960	114,5	66,0
21а	0,015	0,050	2,025	1960	111,8	64,5
22	0,015	0,052	1,124	1090	75,7	43,7
23	0,015	0,052	1,777	1720	96,0	55,4
24	0,015	0,053	1,103	1070	159,9	92,3
24а	0,015	0,053	1,103	1070	136,1	78,5
25	0,015	0,053	1,560	1510	140,2	80,9
26	0,015	0,053	1,910	1850	123,7	71,3
26а	0,015	0,053	1,910	1850	171,6	99,0
27	0,015	0,055	1,063	1030	108,7	62,7
27а	0,015	0,055	1,063	1030	84,7	48,8
28	0,015	0,055	1,503	1450	144,6	83,4
28а	0,015	0,055	1,503	1450	103,6	59,8
29	0,015	0,055	1,841	1780	150,0	86,5

№ опыта	$d_{ин}, м$	$r, м$	U_r	Re_r	$\alpha, Вт/(м^2 \cdot К)$	Nu_r
29а	0,015	0,055	1,841	1780	126,0	72,7
30	0,015	0,075	0,779	750	106,5	61,5
30а	0,015	0,075	0,779	750	76,2	43,9
31	0,015	0,075	1,103	1070	123,7	71,3
31а	0,015	0,075	1,103	1070	149,5	86,2
32	0,015	0,075	1,350	1310	132,8	76,6
32а	0,015	0,075	1,350	1310	158,6	91,5
33	0,015	0,090	0,649	630	161,6	93,2
33а	0,015	0,090	0,649	630	84,4	48,7
34	0,015	0,090	0,919	890	154,1	88,9
34а	0,015	0,090	0,919	890	162,6	93,8
35	0,015	0,090	1,125	1090	152,6	88,0
35а	0,015	0,090	1,125	1090	231,2	133,4
36	0,015	0,090	0,649	630	102,4	59,1
36а	0,015	0,090	0,649	630	83,0	47,9
37	0,015	0,090	0,919	890	148,4	85,6
37а	0,015	0,090	0,919	890	119,5	68,9
38	0,015	0,090	1,125	1090	135,9	78,4
38а	0,015	0,090	1,125	1090	166,9	96,3
39	0,015	0,018	3,557	3440	260,3	150,2
40	0,015	0,018	6,495	6290	329,9	190,3
41	0,015	0,018	7,821	7570	332,8	192,0
42	0,015	0,055	1,164	1130	147,1	84,8
43	0,015	0,055	2,126	2060	206,4	119,1
44	0,015	0,055	2,560	2480	229,5	132,4
45	0,015	0,075	0,854	830	135,3	78,1
46	0,015	0,075	1,559	1510	220,3	127,1
47	0,015	0,075	1,877	1820	231,0	133,2
48	0,025	0,018	3,247	5240	81,5	78,3
49	0,025	0,018	4,593	7410	123,6	118,8
50	0,025	0,018	5,625	9070	137,2	132,0
51	0,025	0,050	1,169	1890	68,1	65,5
52	0,025	0,050	1,653	2670	91,2	87,7
53	0,025	0,050	2,025	3270	103,4	99,4
54	0,025	0,090	0,650	1050	98,8	95,0

№ опыта	$d_{ш}, м$	$r, м$	U_r	Re_r	$\alpha,$ Вт/(м²·К)	Nu_r
55	0,025	0,090	0,919	1480	120,5	115,8
56	0,025	0,090	1,125	1810	133,7	128,5
57	0,025	0,018	3,247	5240	127,8	122,9
58	0,025	0,018	4,593	7410	165,4	159,0
59	0,025	0,050	1,169	1890	94,8	91,2
60	0,025	0,050	1,653	2670	113,7	109,4
61	0,025	0,090	0,650	1050	108,3	104,1
62	0,025	0,090	0,919	1480	119,6	115,0