

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Институт: Энергетический
 Специальность: 13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника
 Кафедра: Атомных и тепловых электростанций

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА В КАНАЛЕ С ПОРИСТОЙ ВСТАВКОЙ

УДК 621.1.016.7.001.5:662.76.032

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Б	ОПЕНЫШЕВ Павел Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры атомных и тепловых электростанций	М.А. Шеремет	д.ф.-м.н., доцент		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры менеджмента	А.А. Фигурко	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент кафедры ЭБЖ	М.В. Василевский	к.т.н.		

По нормоконтролю

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ст. преподаватель	М.А. Вагнер	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
атомных и тепловых электростанций	А.С. Матвеев	к.т.н., доцент		

Томск – 2016 г.

**Запланированные результаты обучения выпускника образовательной программы
магистра по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника»**

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критериев и/или заинтересованных сторон
	Универсальные компетенции	
P1	Использовать представления о методологических основах научного познания и творчества, анализировать, синтезировать и критически оценивать знания	Требования ФГОС (ОК- 8, 9; ПК-4), Критерий 5 АИОР (п.2.1), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P2	<i>Активно</i> владеть <i>иностраным языком</i> на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты инновационной инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-3; ПК-8, 24), Критерий 5 АИОР (п.2.2), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P3	Эффективно работать индивидуально, в качестве <i>члена и руководителя группы</i> , состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность <i>следовать корпоративной культуре</i> организации, осуществлять педагогическую деятельность в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ОК-4, 5; ПК-3, 16, 17, 25, 27, 28, 32), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P4	Демонстрировать <i>глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов</i> инновационной инженерной деятельности, компетентность в вопросах <i>устойчивого развития</i> .	Требования ФГОС (ОК-7), Критерий 5 АИОР (пп.2.4, 2.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P5	<i>Самостоятельно учиться и</i>	Требования ФГОС (ОК-1, 2,

	непрерывно <i>повышать квалификацию</i> в течение всего периода профессиональной деятельности.	6), Критерий 5 АИОР (п.2.6), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
	Профессиональные компетенции	
P6	Использовать <i>глубокие</i> естественнонаучные, математические и инженерные <i>знания</i> для создания и применения <i>инновационных</i> технологий в теплоэнергетике	Требования ФГОС (ПК-1, 5), Критерии 5 АИОР (п.1.1), согласованные с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P7	Применять <i>глубокие знания</i> в области современных технологий теплоэнергетического производства для постановки и решения задач <i>инженерного анализа</i> , связанных с созданием и эксплуатацией теплотехнического и теплотехнологического оборудования и установок, с использованием системного анализа и моделирования объектов и процессов теплоэнергетики	Требования ФГОС (ПК-2, 7, 11, 18 – 20, 29, 31), Критерий 5 АИОР (пп.1.1, 1.2, 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P8	Разрабатывать и планировать к разработке технологические процессы, <i>проектировать</i> и использовать <i>новое</i> теплотехнологическое оборудование и теплотехнические установки, в том числе с применением компьютерных и информационных технологий	Требования ФГОС (ПК-9, 10, 12 – 15, 30), Критерий 5 АИОР (п. 1.3), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P9	Использовать современные достижения науки и передовой технологии в теоретических и экспериментальных научных исследованиях, интерпретировать и представлять их результаты, давать практические рекомендации по	Требования ФГОС (ПК-6, 22 – 24,), Критерий 5 АИОР (п. 1.4), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

	внедрению в производство	
P10	Применять методы и средства автоматизированных систем управления производства, обеспечивать его <i>высокую эффективность</i> , соблюдать правила охраны здоровья и безопасности труда на теплоэнергетическом производстве, выполнять требования по защите окружающей среды.	Требования ФГОС (ПК-21, 26), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>
P11	Готовность к педагогической деятельности в области профессиональной подготовки	Требования ФГОС (ПК-32), Критерий 5 АИОР (п. 1.5), согласованный с требованиями международных стандартов <i>EUR-ACE</i> и <i>FEANI</i>

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Институт Энергетический
Направление подготовки **13.04.01 Теплоэнергетика и теплотехника**
Кафедра «Атомных и тепловых электростанций»

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой АТЭС ЭНИН
А.С. Матвеев

(Подпись)

(Дата)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

(бакалаврской работы, /работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4Б	Опенышеву Павлу Владимировичу

Тема работы:

Математическое моделирование тепломассопереноса в канале с пористой вставкой

Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 3057/с от 20.04.16
---	----------------------

Срок сдачи студентом выполненной работы:	20 мая 2016 года
--	------------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Объектом исследования является канал с пористым материалом, в том числе рабочая зона газогенератора. Цель работы – исследование процессов тепломассопереноса в канале, заполненном пористой вставкой, на основе математического моделирования. Работа проведена с использованием пакета вычислительной гидродинамики FLUENT для численного анализа режимов течения и теплопереноса совместно с сеточным генератором GAMBIT.
---------------------------------	---

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Основы математического моделирования; 2. Использование пористых материалов в теплоэнергетике; 3. Пакет вычислительной гидродинамики FLUENT; 4. Верификация используемого программного кода; 5. Численное моделирование гидродинамики и теплопереноса в пористых средах; 6. Анализ моделей турбулентности; 7. Моделирование гидродинамики при наличии неподвижной пористой вставки; 8. Введение в газификацию твердого топлива; 9. Аprobация модели двухфазного течения в канале.
---	---

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	отсутствует
---	-------------

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент	Фигурко А.А., доцент кафедры менеджмента
Социальная ответственность	Василевский М.В. , доцент кафедры экологии и безопасности жизнедеятельности

Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках: Основы математического моделирования. Использование пористых материалов в теплоэнергетике. Численное моделирование гидродинамики и теплопереноса в пористых средах. Анализ моделей турбулентности. Введение в газификацию твердого топлива.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	28 декабря 2015 года
---	-----------------------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор кафедры АТЭС	Шеремет М.А.	Д.Ф.-М.Н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Б	Опенышев П. В.		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4Б	Опеньшеву Павлу Владимировичу

Институт	Энергетический	Кафедра	ЭНИИ
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов	Зарботная плата инженера (дипломника) 95780 руб., руководителя – 27910, надбавка за повышенную интенсивность труда – 2500 руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Отчисления во внебюджетные фонды – 30 % от оплаты труда, накладные расходы – 80 % от размера заработной платы

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Техничко-экономическое обоснование технического проекта	Перечень этапов, работ и распределение исполнителей по данным видам работ. Составление диаграммы Исикавы. Формирование сметы проекта по статьям затрат.
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. менеджмента	Фигурко Аркадий Альбертович	к.э.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Б	Опеньшев Павел Владимирович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
5БМ4Б	Опенышеву Павлу Владимировичу

Институт	ЭНИН	Кафедра	АТЭС
Уровень образования	Магистр	Направление/специальность	Теплоэнергетика и теплотехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

Характеристика объекта исследования и области его применения	<p>В данной работе приводится исследование влияния вставки пористого материала на структуру течения и теплоперенос в канале некоторой формы. Использование полученных результатов предполагается при решении другой актуальной проблемы – газификация органического топлива. Газогенераторные станции позволяют эффективно превращать кусковые отходы и низкосортное твердое топливо в чистый генераторный газ, удобный для последующего сжигания.</p> <p>Большая часть работы выполняется за компьютером, поэтому рабочим местом является аудитория с компьютерами - 32-я аудитория четвёртого учебного корпуса ТПУ.</p>
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Производственная безопасность	<ul style="list-style-type: none"> - Анализ вредных и опасных факторов при разработке проектируемого решения; - разработка мероприятий по снижению выявленных воздействий
2. Экологическая безопасность	<ul style="list-style-type: none"> - Анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); - анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); - разработать решения по обеспечению экологической безопасности.
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	<ul style="list-style-type: none"> - Перечень возможных ЧС при эксплуатации проектируемого решения; - выбор наиболее типичной ЧС и разработка мер по ее предупреждению; - разработка действий в результате возникшей ЧС.
4. Организационные вопросы обеспечения безопасности	<ul style="list-style-type: none"> - Рассмотреть 3 уровня социальной ответственности предприятия.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	19.02.16
---	----------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ЭБЖ	Василевский Михаил Викторович	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5БМ4Б	Опенышев Павел Владимирович		

Реферат

Выпускная квалификационная работа 105 с., 22 рис., 5 табл., 19 источников, 1 прил.

Ключевые слова: КАНАЛ, ПОРИСТАЯ ВСТАВКА, ГАЗОГЕНЕРАТОР, ПРОФИЛЬ СКОРОСТИ, ТЕМПЕРАТУРА, ОБЪЕМНАЯ ДОЛЯ, ПЫЛЕУГОЛЬНЫЕ ЧАСТИЦЫ, ФУРМА.

Объектом исследования является канал с пористым материалом, в том числе рабочая зона газогенератора.

Цель работы – исследование процессов тепломассопереноса в канале, заполненном пористой вставкой, на основе математического моделирования.

Работа проведена с использованием пакета вычислительной гидродинамики FLUENT для численного анализа режимов течения и теплопереноса совместно с сеточным генератором GAMBIT.

В результате исследований установлены особенности использования различных приближений к математическому моделированию тепломассопереноса в каналах с пористыми вставками, а также показана возможность применения пакетов вычислительной гидродинамики для анализа термогидродинамических структур в канале газогенераторной установки при наличии частиц угольного топлива без учета влияния физико-химических особенностей процесса газификации.

Оглавление

Введение.....	11
1 Основы математического моделирования.....	13
2 Использование пористых материалов в теплоэнергетике.....	17
3 Пакет вычислительной гидродинамики FLUENT.....	21
4 Верификация используемого программного кода.....	25
5 Численное моделирование гидродинамики и теплопереноса в пористых средах.....	29
6 Анализ моделей турбулентности.....	33
7 Моделирование гидродинамики при наличии неподвижной пористой вставки.....	38
8 Введение в газификацию твердого топлива.....	44
9 Модель двухфазного течения в канале.....	49
10 Исследование влияния угла наклона фурм газогенератора на структуру течения и теплоперенос.....	54
11 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	58
12 Социальная ответственность.....	65
Заключение.....	84
Список публикаций студента.....	86
Список используемых источников.....	87
Приложение А. Перевод разделов на английский язык.....	89

Введение

Развитие топливно-энергетического комплекса, а также химической, пищевой, авиационной и других отраслей промышленности предполагает непрерывный рост теплонапряженности составных элементов энергетического оборудования. Решение целого ряда возникающих при этом вопросов возможно только в результате существенной интенсификации процессов теплопереноса. Одним из способов повышения интенсивности таких процессов является использование в теплообменных устройствах пористых материалов. Большая интенсивность теплообмена между проницаемой матрицей пористой структуры и протекающим сквозь нее теплоносителем вследствие очень развитой поверхности их соприкосновения определяет эффективность данного подхода. Детальное изучение особенностей гидродинамики и теплообмена в рассматриваемых системах возможно только на основе полного математического моделирования процессов переноса массы, импульса и энергии в канале при наличии вставки пористого материала.

Если в качестве канала рассматривать рабочую зону шахты газогенератора, то засыпка пылеугольных частиц соответствует гранулированной пористой среде, исследование поведения которой также было проведено в рамках данной работы. Дело в том, что проблемой при эксплуатации газификаторов является отсутствие надежных инженерных методик расчета работы подобного оборудования. Разработка математических моделей на основе анализа физико-химических особенностей процесса газификации является актуальной научной задачей, поскольку ее решение сможет значительно ускорить этапы проектирования газогенераторных установок [1].

В рамках работы проведен литературный обзор использования пористых материалов в теплоэнергетике, описаны численные модели пористых сред и представлено сравнение произведенного моделирования гидродинамики при наличии неподвижной пористой вставки как на основе модели Дарси

эффективной среды, так и с использованием подхода дискретности пористой среды. Кроме того, в тексте приведены основы газификации твердого топлива и описана используемая наиболее общая модель двухфазного течения в канале рабочей зоны газогенератора без учета химических превращений, свойственных реальному процессу получения генераторного газа.

Результаты исследования могут быть использованы в теплоэнергетической отрасли при проектировании новых теплообменных и газогенераторных аппаратов или модернизации уже существующих.

1 Основы математического моделирования

Моделирование подразумевает замещение объекта исследования некоторой его моделью. Модель – это абстрактный образ какого-либо объекта, удобный для проведения исследований с целью получения об объекте необходимой информации и позволяющий адекватно отображать интересующие исследователя характеристики и физические свойства объекта. Проведение таких исследований удобно в силу различных факторов: доступность и легкость получения информации, уменьшение материальных затрат на исследование, сокращение сроков и др.

Посредством математических зависимостей и символов математическое моделирование позволяет описать функционирование технического объекта во внешней окружающей среде, оценить показатели качества и эффективности, определить выходные параметры и характеристики, осуществить поиск оптимальной структуры и параметров объекта. В этом случае математическая модель становится одним из основных компонентов системы проектирования.

Математическая модель – это совокупность математических объектов и связей между ними, которая адекватно отображает физические свойства создаваемого технического объекта. Под математическими объектами могут подразумеваться числа, векторы, множества, переменные, матрицы и т.д. Процесс разработки математической модели и дальнейшего ее использования для анализа и синтеза называется математическим моделированием.

Для осуществления вычислительных экспериментов на ЭВМ необходимо разработать алгоритм, по которому будет реализована математическая модель.

Алгоритм представляет собой предписание, которое определяет последовательность выполнения операций в процессе вычисления. Алгоритмы чаще всего для наглядности могут быть представлены в виде графов или схем, давать словесное (вербальное) описание. Если алгоритм записать в форме, воспринимаемой вычислительной машиной, то он будет представлять собой

программную модель. Тогда процесс программирования можно назвать программным моделированием.

Автоматизированное проектирование в своем развитии прошло несколько стадий. Сначала ЭВМ находило свое применение лишь при выполнении вычислений по методикам, отражающим ручное решение. Это не подразумевало внесения чего-то нового в процесс проектирования, а только приводило к ускорению выполнения отдельных его этапов. Затем началось использование математических моделей, позволяющих имитировать функционирование проектируемых объектов, что привело к повышению точности получаемой информации, достижению универсальности описания отдельных проектных процедур и операций, организации поиска оптимальных проектных решений. Для целого класса технических объектов были разработаны единые подходы для получения математических моделей. Таким образом, процесс по формированию математических моделей стало возможным возложить прямо на ЭВМ. Далее основные свои усилия исследователи направили на разработку методологии и стратегии автоматизированного проектирования [2].

Проектирование является сложным иерархическим процессом, включающим множество взаимосвязанных этапов и стадий, что приводит к необходимости применять большое количество разнообразных моделей. При построении эффективной технологии автоматизированного проектирования основой теперь становится математическое моделирование технических объектов. В таком случае инженеру-проектировщику необходимо иметь четкое понимание режимов функционирования технических объектов и методов их моделирования, видов математических моделей и способов их построения, разработки алгоритмических моделей и их эффективной реализации с использованием современных средств вычислительной техники.

В процессе проектирования объектов теплоэнергетики одной из основных задач является определение гидродинамических характеристик или же параметров потока (поля скоростей, наличие отрывных или застойных зон

и т.д.). Долгое время основным способом решения этой задачи оставался экспериментальный. Однако экспериментальное исследование связано с рядом технических и фундаментальных трудностей. Технические трудности обусловлены высокой стоимостью и трудоемкостью таких исследований. Кроме того, при этом возможна зависимость от внешних условий, а также ограниченность получаемой информации (которая может быть получена не во всей области определения независимых переменных, содержать только интегральные параметры, и т.п.). Фундаментальные трудности обусловлены влиянием масштабного эффекта. В связи с вышесказанным, численные методы исследования, которые лишены многих указанных недостатков, находят все большее применение. Эти методы составляют содержание раздела гидромеханики, называемого вычислительной гидродинамикой (CFD, Computational Fluid Dynamics). Экспериментальные исследования же при этом становятся средством для верификации получаемых результатов и настройки параметров численного метода [3].

К основным стадиям численного решения задач с использованием ЭВМ в общем случае можно отнести следующие [4]:

- а) постановка задачи является самым первым шагом, когда происходит обоснование физической постановки задачи и определяется способ ее решения;
- б) на стадии моделирования выбирается математическая модель, которая описывает соответствующую постановку задачи. Подразумевается, что выбранная модель должна достаточно хорошо описывать основные законы с физической точки зрения;
- в) для дальнейшего решения поставленной проблемы необходимо найти численный метод, который позволил бы ее свести к некоторому расчетному алгоритму;
- г) следующим этапом является написание алгоритма решения задачи. Как правило, это записанная последовательность логических и арифметических операций;

д) составление программы на одном из языков программирования подразумевает реализацию алгоритма решения, составленного на предыдущем шаге;

е) далее следует отладка этой самой программы, которая состоит из ее тестирования и исправления найденных при этом ошибок;

ж) собственно сам расчет по отлаженной программе;

з) анализ полученных с помощью ЭВМ результатов численного счета. При этом по возможности следует их сравнить с экспериментальными данными. На данной стадии также оформляется соответствующая научно-техническая документация;

и) заключительной стадией численного решения поставленной проблемы с использованием ЭВМ в идеале является внедрение полученных результатов.

Таким образом, численное решение задач в процессе проектирования объектов теплоэнергетики является весьма важным и нужным направлением работ. Однако оно подразумевает выполнение большого количества этапов решения. Использование же современных коммерческих и академических пакетов вычислительной гидродинамики и теплопереноса позволяет упростить приведенную последовательность решения задач, а иногда и исключить из нее некоторые стадии.

2 Использование пористых материалов в теплоэнергетике

В последние годы во многих отраслях техники важной проблемой является создание компактных высокоэффективных теплообменных аппаратов различного назначения. Возникающие при этом задачи могут быть успешно решены лишь при интенсификации процессов теплообмена. Использование в теплообменных устройствах пористых материалов является одним из эффективных и перспективных способов интенсификации теплообменных процессов. Физическая основа этого способа заключается в высокой интенсивности теплообмена между металлическим каркасом и протекающим сквозь него теплоносителем вследствие высокоразвитой поверхности их соприкосновения и эффективного перемешивания в порах.

Простота изготовления из пористых материалов элементов конструкций, широкий диапазон получаемых свойств и высокая интенсивность теплообмена дают возможность использования пористых материалов в самых различных условиях.

В настоящее время с использованием различных технологий созданы пористые материалы различной структуры. Большой интерес представляют структуры высокой пористости, имеющие малый вес и низкое гидравлическое сопротивление, что особенно важно при фазовых превращениях теплоносителя. Однако если характеристики и процессы тепломассообмена для структур малой и средней пористости достаточно изучены, то для структур высокой пористости эти вопросы исследованы не достаточно глубоко.

Пористым средам, в том числе и пористым металлам (рисунок 2.1), присущ целый ряд параметров, которые в отдельности не дают полного представления о свойствах пористого тела. К таким параметрам, которые определяют пористую структуру, относятся: проницаемость и ее распределение по площади фильтрации пористого тела; пористость, ее вид и распределение по объему тела; просвет; коэффициент извилистости и форма пор; распределение пор по размерам, максимальные и минимальные размеры пор; удельная

поверхность пор; вязкостный и инерционный коэффициенты; состояние поверхности пор; физико-механические свойства тела и другие характеристики.

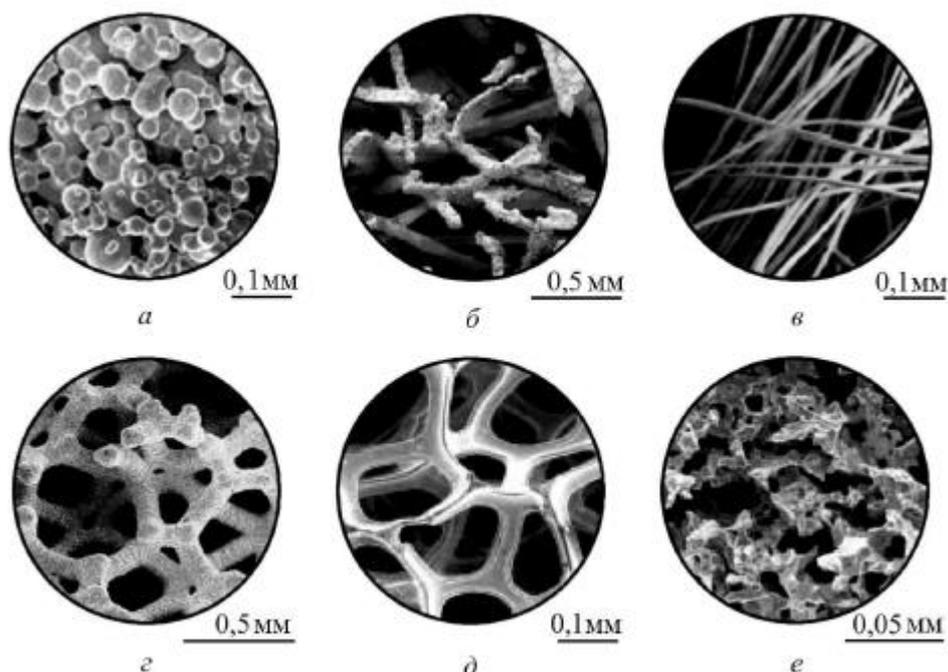


Рисунок 2.1 - Микрофотографии образцов различных пористых материалов: а) капельная микроструктура пористого материала из никель-хром-молибденового сплава; б) волокнистый пористый материал из никель-алюминиевого сплава; в) пористый материал из углеродного волокна; г) пористый вольфрам с вспененной структурой; д) пористый никель с вспененной структурой; е) пористый алюминий с ячеистой пеноподобной структурой [5]

Тепловой и гидравлический расчет теплообменных аппаратов на основе пористых структур проводится с помощью уравнений сохранения импульса сил, массы и энергии с соответствующими граничными и начальными условиями. Однако реальным пористым структурам характерны существенные особенности. Поскольку поры, как правило, представляют собой искривленные каналы изменяющегося поперечного сечения как по размерам, так и по форме, то для описания характера течения жидкостей в порах необходима осторожность при использовать закономерностей, справедливых для каналов правильной геометрической формы. Так, математическая модель в общей постановке достаточно сложна и не имеет точного аналитического решения.

Поэтому вводятся различного рода допущения и эмпирические зависимости для коэффициентов переноса, входящих в уравнения и граничные условия.

Рядом исследователей [6] предложены различные модели пористого тела для установления закономерностей течения жидкостей в порах. К ним относятся каналы с большим числом сосредоточенных гидросопротивлений (щелей различной формы, дроссельных шайб, равномерно расположенных по длине канала), круглые каналы с переменным проходным сечением и др. Однако, подобные решения не могут служить абсолютной расчетной моделью реальной пористой структуры, так как не отражают полностью явлений, которые происходят при фильтрации жидкостей в порах.

В науке и технике используются упорядоченные и неупорядоченные (хаотические) структуры.

К упорядоченным структурам относятся вафельные, щеточные, перекрестные и щелевые микроканалы, наборы перфорированных пластин, шаровые засыпки.

Щеточные структуры образуются при помощи пучка круглых в сечении шипов (стержней), которые перпендикулярны теплообменной поверхности (стенке) и обтекаются потоком теплоносителя в поперечном направлении.

Вафельные структуры аналогичны щеточным за тем исключением, что шипы (ребра, призмы) вафельной структуры при их коридорном или шахматном расположении имеют острые ребра, влияющие на характер обтекания шипов.

Пористый слой со щелевой структурой характеризуется отсутствием межканального перемешивания. Он состоит из параллельных щелей, представляющихся каналами прямоугольной формы, и плоских ребер, их разделяющих.

К неупорядоченным структурам можно отнести пружинные вставки; сетчатые материалы, которые образуются спечением металлических сеток различного плетения; волокнистые материалы и металлорезину, образованную спеченной хаотической намоткой проволоки; зернистые или порошковые

структуры, сформированные путем спекания металлических порошков; а также высокопористые проницаемые ячеистые материалы (пороматериалы, ВПЯМ), являющиеся наиболее перспективными для изготовления габаритных облегченных теплонагруженных элементов.

Пористые вставки в каналы могут быть созданы с переменной по длине или поперечному сечению удельной поверхностью и пористостью. Однако, при вставке в каналы пористых материалов происходит резкое возрастание гидравлического сопротивления, являющееся следствием неблагоприятного в аэродинамическом отношении профиля обтекания. Тогда встает вопрос о создании устройств, которые позволили бы достичь высокого уровня интенсификации теплообмена вместе с приемлемым уровнем гидравлического сопротивления.

3 Пакет вычислительной гидродинамики FLUENT

В настоящее время существует большое количество коммерческих и академических пакетов вычислительной гидродинамики и теплопереноса (ANSYS CFX, ANSYS FLUENT, STAR-CD, FlowVision, σFLOW, SINF, VP2/3, OpenFOAM), применяемых для решения широкого круга практических задач. Сущность подхода, применяемого в них при численных исследованиях, заключается в аппроксимировании искомой непрерывной функции набором приближенных значений в узлах – некотором множестве точек. Совокупность этих связанных между собой определенным образом узлов называется сеткой, которая становится дискретной моделью области определения искомой функции.

В данной работе предполагается использование CFD пакета FLUENT совместно с сеточным генератором GAMBIT для численного анализа режимов течения в канале с пористой вставкой в ламинарном и турбулентном приближениях. С помощью данного пакета проведено исследование влияния целого ряда параметров (геометрические и теплофизические характеристики пористой вставки, интенсивность течения) на структуру течения и теплоперенос.

FLUENT является универсальным программным комплексом, предназначенным для решения задач механики жидкостей и газов. Он использует неструктурированную сеточную технологию, когда сетка может состоять из элементов разнообразной формы: треугольников и четырехугольников для двумерных моделей и тетраэдров, гексаэдров, призм и пирамид для трехмерных моделей. Мощный решатель и сложные численные схемы гарантируют получение точных результатов. Для совместного решения основных уравнений существует возможность использования матричного алгоритма, что повышает устойчивость численного решения, а применение non-iterative временной схемы для переходных процессов значительно

уменьшает время решения. Так данный программный комплекс оказался среди лидеров рынка коммерческих CFD программ.

К задачам, которые позволяет решать программный комплекс Fluent, относятся следующие:

- течение жидкостей и газов в каналах произвольной формы;
- внешнее обтекание;
- теплопередача в случаях вынужденной и свободной конвекции, лучистого теплообмена);
- течение со свободной поверхностью;
- течение многофазных сред;
- реагирующие потоки, включая горение;
- движение капель жидкости и твердых частиц в потоке;
- фазовые превращения веществ (испарение, кристаллизация, плавление, кипение, кавитация);
- течение в движущихся каналах (например, в турбомашинах);
- моделирование течений в каналах с изменяющейся геометрией в процессе решения (например, в цилиндрах ДВС);
- акустика.

Процесс исследования с помощью программного комплекса Fluent в общем случае показан на рисунке 3.1 [7]. Первые три стадии решения задачи реализуются при помощи программы Gambit, которая является составной частью программного комплекса, а последующие этапы выполняются уже непосредственно в самой программе Fluent.

Весь интерфейс программы является англоязычным.

Окно программы FLUENT (рисунок 3.2) состоит из трех основных элементов:

- главного меню, находящегося в верхней части основного окна, через которое осуществляется доступ к основным командам и меню программы;

- окна сообщений, в котором находится командная строка, откуда можно получить доступ ко всем командам программы. Кроме того, в окне сообщений отображаются результаты выполнения команд и сообщения об ошибках;
- графических окон, в которых отображаются результаты расчета и построений (на рисунке не показано).

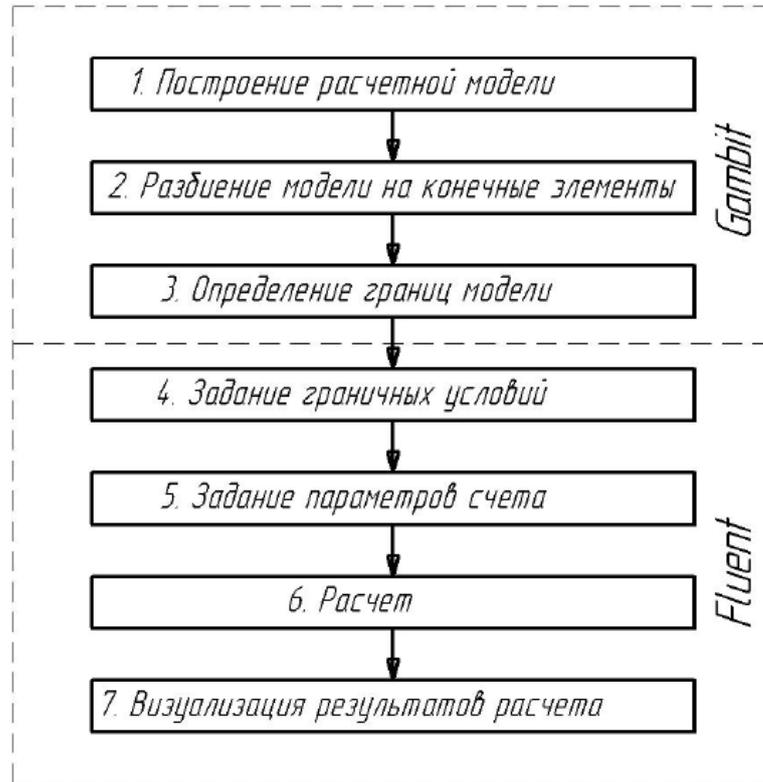


Рисунок 3.1 - Стадии решения гидродинамических задач [7]

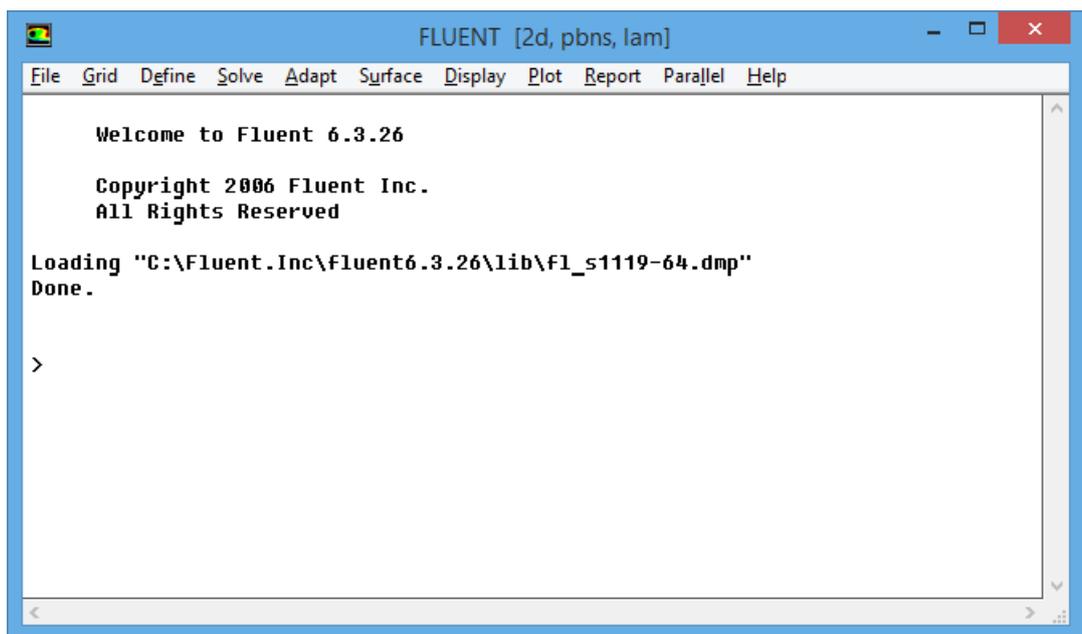


Рисунок 3.2 – Основное окно программы

Главное меню программы FLUENT функционально разбито на пять основных секций:

- подменю работы с расчетной моделью (*File*), которое включает в себя чтение и запись, импорт и экспорт моделей и результатов расчета;

- подменю подготовки расчетной модели (*Grid* и *Define*), где находятся команды проверки сетки и манипуляции с ней, граничных условий, задания физических и турбулентных моделей и т.д.;

- подменю *Solve*, которое включает в себя команды настройки решателя, инициализации начальных значений, запуска решения и управления наблюдением за ходом решения и т.д.;

- подменю *Adapt*, которое по результатам решения предоставляет доступ к командам адаптации сетки;

- подменю отображения результатов расчета (*Surface*, *Display*, *Plot* и *Report*), где находятся команды отображения результатов расчета различными способами: в виде векторов, полей, графиков, интегральных значений параметров и т.д.

4 Верификация используемого программного кода

Целью данного раздела является обеспечение гарантий того, что установленное и настроенное программное обеспечение FLUENT в состоянии производить адекватные численные исследования.

Проверка кода была произведена на основе моделирования свободноконвективного теплопереноса в квадратной полости с внутренним теплопроводным твердым элементом квадратной формы, расположенным в центре. Полученные данные сравнивались с результатами авторов статьи [8].

Постановка задачи выглядит следующим образом: длина сторон квадратной полости равна L (рисунок 4.1). Правая вертикальная стенка является холодной ($T = T_x$), противоположная стенка поддерживается при постоянной высокой температуре ($T = T_2$). Оставшиеся горизонтальные стенки считаются адиабатическими. Твердый теплопроводный блок (теплопроводность материала λ_m) квадратной формы с центром в точке $L/2$ имеет стороны длиной $W = L/2$. Течение внутри полости считается ламинарным, гравитационное ускорение действует вертикально вниз. Задача формулируется в стационарном приближении.

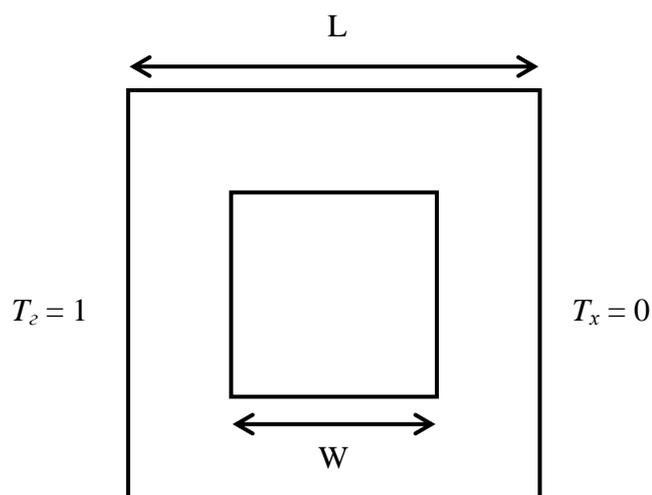


Рисунок 4.1 – Геометрическая постановка задачи

Естественная конвекция в данном случае определяется дифференциальными уравнениями сохранения массы, импульса и энергии.

Уравнения естественной конвекции упрощаются с помощью приближения Буссинеска, в котором предполагается, что изменение плотности учитывается только в уравнении движения.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (4.1)$$

Уравнение сохранения импульса в проекции на ось x:

$$\frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (4.2)$$

Уравнение сохранения импульса в проекции на ось y:

$$\frac{\partial(uv)}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \text{Pr} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + Ra \text{Pr} T \quad (4.3)$$

Уравнение энергии для жидкости:

$$\frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4.4)$$

Уравнение энергии для твердого тела:

$$\frac{\partial \left(\lambda^* \frac{\partial T}{\partial x} \right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\lambda^* \frac{\partial T}{\partial y} \right)}{\partial y} = 0, \quad (4.5)$$

где λ^* представляет собой отношение теплопроводности тела к теплопроводности жидкости.

В приведенных уравнениях использованы следующие безразмерные переменные:

$$x = \frac{x^*}{L}, y = \frac{y^*}{L}, u = \frac{u^* L}{\alpha}, v = \frac{v^* L}{\alpha}, p = \frac{p^* L^2}{\rho \cdot \alpha^2}, \alpha = \frac{\lambda_m}{\rho \cdot c_p}, T = \frac{T_z^* - T_x^*}{\Delta T^*}, Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\mathcal{G} \cdot \alpha}$$

где x^* и y^* – координаты, м; u^* и v^* – компоненты скорости по направлениям вдоль осей x и y, м/с; p^* – давление, Па; α – температуропроводность, м²/с; ρ – плотность, кг/м³; T_z^* и T_x^* – температуры горячей и холодной стенок, К; g – ускорение свободного падения, м/с²; β – коэффициент теплового расширения жидкости, К⁻¹; \mathcal{G} – кинематическая вязкость, м²/с; c_p – изобарная теплоемкость, Дж/(кг·К).

Геометрическая модель с квадратной конечно-элементной сеткой была воссоздана в препроцессоре «GAMBIT». Созданная область далее экспортировалась в программный пакет «FLUENT», где полностью определялись характеристики сред, граничные условия и параметры численной методики.

По итогам расчета получена хорошая сходимость решения и достигнуто полное соответствие с результатами [8] (рисунки 4.2, 4.3).

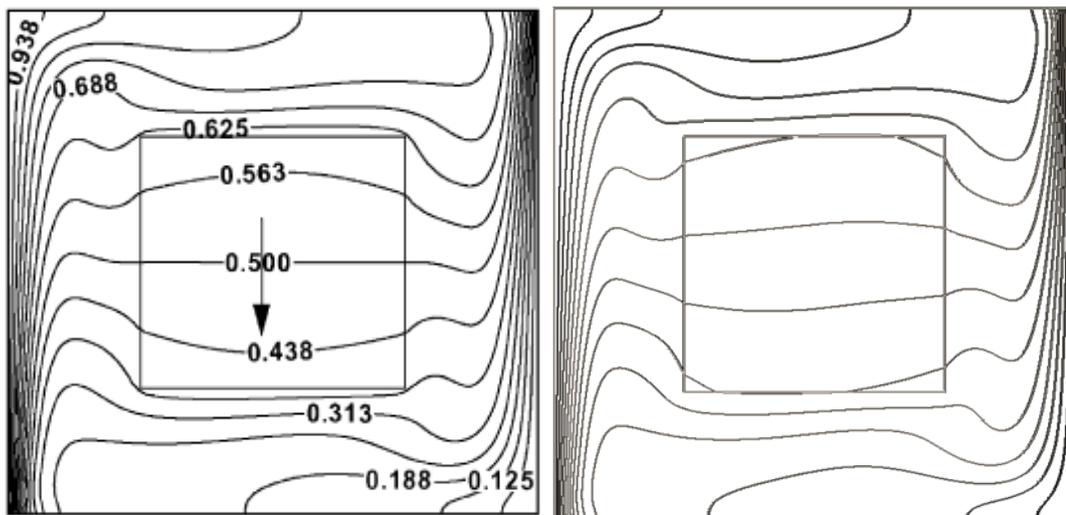


Рисунок 4.2 – Сравнение изолиний распределения температур, взятых из статьи (слева) и проведенного расчета (справа)

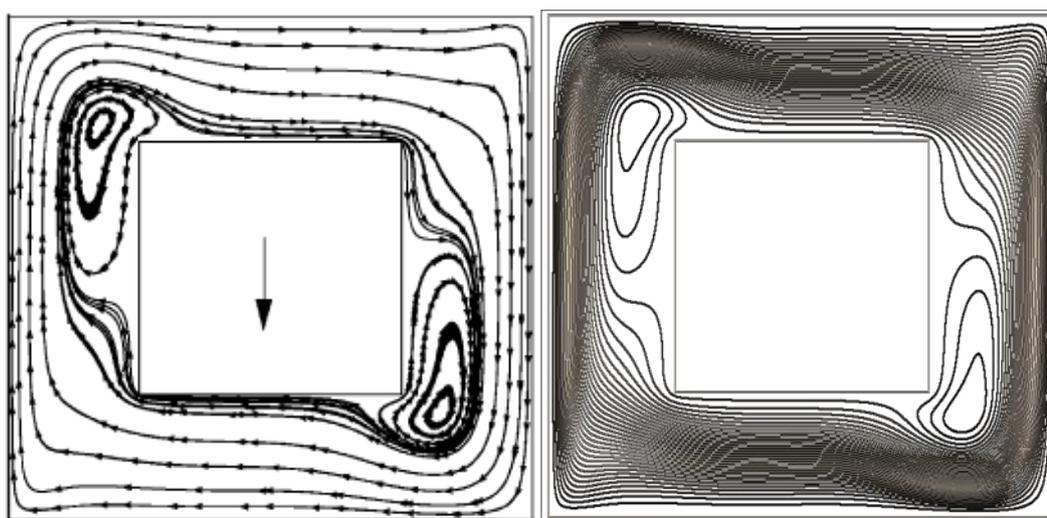


Рисунок 4.3 – Сравнение линий тока, взятых из статьи (слева) и проведенного расчета (справа)

Распределения изотерм показывают, что большая часть теплопередачи на горячей стенке происходит в нижней ее части, а внутри проводящего блока перенос теплоты происходит в направлении адиабатических стенок.

В результате конвективного течения внутри полости наличие теплопроводного блока приводит к формированию двух вихрей вблизи левой и правой стенок теплопроводного блока.

На рисунке 4.4 отображены невязки (погрешность) расчета: по всем уравнениям в процессе решения они не меняются существенно и достигают значения меньше рекомендуемого предела 10^{-3} .

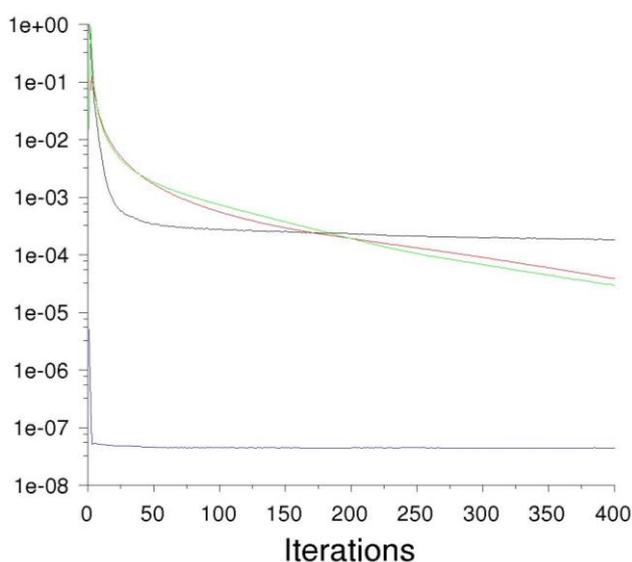


Рисунок 4.4 – График невязок счета

5 Численное моделирование гидродинамики и теплопереноса в пористых средах

Для того, чтобы приступить к анализу и рассмотрению движения жидкости в пористой среде, необходимо представить описание существующих гидродинамических соотношений, которые можно использовать для исследования любого течения.

Как известно, системой уравнений Навье-Стокса описывается движение несжимаемой вязкой жидкости в поле массовых сил:

$$\begin{cases} \rho \frac{du_x}{dt} = \rho X - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right); \\ \rho \frac{du_y}{dt} = \rho Y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} \right); \\ \rho \frac{du_z}{dt} = \rho Z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \right), \end{cases} \quad (5.1)$$

где t – время; x, y, z – координаты частицы жидкости; u_x, u_y, u_z – проекции ее скорости; X, Y, Z – проекция объемной силы; P – давление; μ – динамическая вязкость.

Физический смысл членов уравнений Навье – Стокса в терминах баланса сил означает следующее: член в левой части выражает силы инерции; первое слагаемое в правой части – внешние массовые силы; второе - силы давления; третье – силы внутреннего трения, вязкости. Однако, в системе из трех уравнений имеем четыре неизвестные: P, u_x, u_y, u_z . Для замыкания данной системы ее необходимо дополнить еще одним уравнением, в качестве которого используется уравнение неразрывности [9]. Уравнение неразрывности выражает закон сохранения массы, записанный для движущейся жидкой среды:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0. \quad (5.2)$$

Физически уравнение (5.2) означает, что при движении несжимаемой жидкости скорость ее объемной деформации равна нулю.

Таким образом, система из указанных четырех уравнений описывает целый класс задач, а именно любое течение жидкости, когда ее плотность остается постоянной. Для того, чтобы из этого класса выделить конкретную задачу необходимо задать условия однозначности.

Стоит отметить, если воздух или газ движется с небольшой скоростью, которая намного меньше скорости звука (до 50 м/с), то для такого потока можно считать $\rho = const$.

С одной стороны, движение жидкости в пористой среде рассматривается в качестве одного из случаев общей проблемы струйного течения жидкостей среди непроницаемых стенок, и течение через поры среды должно в принципе подчиняться классическим уравнениям гидродинамики, так как эти поры имеют фиксированные размеры, а их граничные поверхности – определенные геометрические формы. Однако, с другой стороны, при решении этих классических уравнений возникают математические трудности, которые почти непреодолимы, за исключением случаев с относительно несложной геометрией. Так, решение проблем движения жидкости через каналы извилистой и неправильной формы с помощью этих уравнений остается под большим вопросом, и следует обращаться к другим методам исследования в данной области.

В качестве основной зависимости, определяющей режим течения жидкости в порах, считается связь между градиентом давления в пористой среде и скоростью движения жидкости в порах. Вместо скорости движения жидкости в порах w_n иногда рассматривают скорость фильтрации жидкости w_ϕ . Скорости эти связаны соотношением $w_\phi = w_n \cdot P$, где P – пористость. Скорость жидкости в порах рассчитывается по площади пустот в поперечном сечении образца и является средней скоростью движения жидкости в порах; она точно отражает происходящие процессы с физической точки зрения. Скорость же фильтрации жидкости определяется по полному сечению пористого материала.

Выполнение работ по исследованию процессов в пористых структурах, как правило, базируется на использовании модифицированного закона Дарси,

который связывает градиент давления, вязкостное сопротивление пористой среды, силу тяжести и влияние инерционных сил на гидродинамику течения в пористой структуре:

$$\nabla p = \alpha \cdot \mu \cdot w + \beta \cdot \rho \cdot w^2, \quad (5.3)$$

где α и β – вязкостный и инерционный коэффициенты пористой среды. Они способствуют возникновению градиента давления в пористой ячейке, создавая перепад давления, который пропорционален скорости жидкости (или скорости в квадрате) в этой ячейке. Из-за недостатка сведений о структуре пористой среды попытки теоретического определения коэффициентов α и β не приводят к желаемым результатам, поэтому их определяют в ходе экспериментов по расходным характеристикам пористого материала.

Коэффициент проницаемости пористой среды K и вязкостный коэффициент α связаны соотношением $\alpha = 1/K$. Проницаемость пористой среды – способность материала пропускать жидкость и газ при перепаде давления.

Под абсолютной проницаемостью подразумевается проницаемость пористой среды, которая заполнена только одной инертной к пористой среде фазой. Она характеризует именно физические свойства породы, то есть зависит от структуры и размера поровых каналов, но не зависит от насыщающего флюида. Как правило, абсолютная проницаемость определяется при фильтрации азота через породу. Для оценки проницаемости применяется линейный закон фильтрации Дарси:

$$K = \frac{\mu \cdot Q \cdot L}{\Delta P \cdot F}, \quad (5.4)$$

где K - проницаемость пористой среды, м^2 ; μ - динамическая вязкость флюида, $\text{Па} \cdot \text{с}$; Q - объемный расход флюида, $\text{м}^3/\text{с}$; L - длина образца пористой среды, м ; ΔP - перепад давления, Па ; F - площадь фильтрации, м^2 .

Физический смысл размерности проницаемости $[\text{м}^2]$ – это площадь сечения каналов пористой среды, через которые идет фильтрация.

Если при течении через пористую среду перепад давления принять пропорциональным скорости, а константу β в (5.3) считать равной нулю, тогда

пористая модель сводится к закону Дарси – закону фильтрации жидкостей и газов в пористой среде:

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K} \vec{w}. \quad (5.5)$$

Однако, как показывают опыты [10], установленный первоначально закон Дарси справедлив при малых скоростях и числах Рейнольдса, когда градиент давления с изменением скорости меняется строго линейно:

$$\frac{\Delta P}{\Delta F} = \text{const } w. \quad (5.6)$$

Течение, подчиняющееся уравнению (5.6), в обычной гидродинамике называется ламинарным, когда газ или жидкость движутся слоями и не перемешиваются. При этом не происходит беспорядочных быстрых изменений скорости и давления.

По мере возрастания числа Рейнольдса градиент давления начинает увеличиваться быстрее, чем скорость и приводит к изменениям, лучше всего отраженным в уравнении (5.3). При высоких скоростях потока коэффициент β обеспечивает коррекцию инерционных потерь в пористой среде. Эта константа может рассматриваться как коэффициент потерь на единицу длины вдоль направления потока, тем самым представляя падение давления как функцию скоростного напора. Таким образом, закон Дарси начинает постепенно терять свою справедливость, если поток полностью или частично становится турбулентным.

6 Анализ моделей турбулентности

Инженеру, в большинстве случаев, при решении задач приходится сталкиваться с турбулентными течениями. В этом случае турбулентное перемешивание потока может привести к значительным трудностям при определении основных параметров течения: ламинарно-турбулентный переход, сопротивление трения, толщина пограничного слоя и т.д. Однако, зачастую, инженеру нет необходимости знать детали турбулентных эффектов, так как его интересуют, в первую очередь, осредненные по времени величины, даже если течение нестационарное.

Существуют три основных подхода к решению задач динамики вязкой жидкости: прямое численное моделирование (DNS), метод крупных вихрей (LES) и решение осредненных по времени уравнений Навье-Стокса (RANS) [3].

Первый подход связан с непосредственным решением системы, состоящей из уравнений Навье-Стокса и неразрывности, а два других преобразуют данные уравнения, вследствие чего мелкомасштабными турбулентными пульсациями пренебрегают.

Применение DNS и LES моделей в промышленных задачах крайне ограничено и возможно лишь для наиболее простых геометрических областей, что связано в основном с высокими требованиями моделей к вычислительным ресурсам техники [3]. Поэтому наибольшее распространение при решении турбулентных задач динамики вязкой жидкости нашли RANS-модели.

Рассмотрим принятую в настоящее время классификацию полуэмпирических RANS-моделей:

1. Алгебраические модели, которые в форме алгебраических уравнений устанавливают связь между параметрами осредненного потока и турбулентной вязкостью. Необходимость учета недостатков, описанных в [3], привела к усложнению данных моделей, что делает их непривлекательными. Поэтому подобные модели в настоящее время применяются исключительно для расчета течений в пристеночной области.

2. Модели с одним дифференциальным уравнением переноса характеристики турбулентности. В программном комплексе FLUENT свою реализацию нашла лишь одна подобная модель, предложенная P. Spalart и S. Allmaras [3]. Прежде всего, она предназначена для задач внешней дозвуковой аэродинамики, и ее применимость к широкому классу инженерных проблем еще не достаточно изучена.

3. Модели с двумя дифференциальными уравнениями переноса (двухпараметрические модели) будут рассмотрены ниже.

4. Модели с большим числом уравнений. Они выполняют непосредственный расчет компонент тензора напряжений Рейнольдса на основе дифференциальных уравнений переноса [3]. В целом, эти модели обладают наиболее высокой точностью, но и наибольшим временем счета, поэтому их применение ограничено в настоящее время узким рядом исследовательских задач.

Модели турбулентности с двумя уравнениями переноса остаются наиболее популярными при решении широкого круга инженерных задач вплоть до настоящего времени. Для данного класса моделей предполагается решение независимых уравнений для двух характеристик турбулентности, которые с помощью алгебраических соотношений позволяют определять турбулентную вязкость. В качестве первой характеристики, как правило, выступает величина кинетической энергии турбулентных пульсаций k , $\text{м}^2/\text{с}^2$. Для выбора характеристики турбулентности, для которой формулируется второе уравнение, имеется некоторая свобода. Наибольшее распространение получили две группы моделей: k - ε и k - ω модели, где ε – диссипация энергии турбулентности в $\text{м}^2/\text{с}^3$, а $\omega \sim \varepsilon/k$ представляет собой удельную скорость диссипации (в единице объема и времени). Вихревая вязкость при этом вычисляется как $\nu_t \sim k^2 / \varepsilon$ для первой модели и $\nu_t \sim k / \omega$ для второй.

Стандартная k - ε модель основана на предположении о полностью развитом турбулентном течении, то есть эффекты, вызванные молекулярной

вязкостью, незначительны ($\nu_t \gg \nu$). В таком случае скалярные величины k и ε находятся из следующих уравнений переноса:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon, \quad (6.1)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1} \cdot \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \cdot \frac{\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (6.2)$$

где σ_k , σ_ε , $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$ – полуэмпирические константы турбулентности, определенные экспериментально и изложенные в [3].

RNG k - ε модель построена на основе «стандартной» с использованием теории ренормализованных групп и обходит ряд ограничений «стандартной» k - ε модели благодаря более качественному описанию переноса турбулентности в пристеночных областях и в потоках с малыми числами Рейнольдса [3]. Уравнения переноса остаются такими же, однако коэффициент $C_{\varepsilon 2}$ считается по формуле:

$$C_{\varepsilon 2} = \bar{C}_{\varepsilon 2} + \frac{C_\mu \cdot \lambda^3 (1 - \lambda / \lambda_0)}{1 + \beta \cdot \lambda^3}, \quad (6.3)$$

где $\lambda = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{2 \cdot S_{ij} \cdot S_{ji}}$, $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ – тензор скоростей деформаций;

C_μ , $\bar{C}_{\varepsilon 2}$, β , λ_0 – полуэмпирические константы турбулентности.

Realizable k - ε модель основана на динамическом уравнении для среднеквадратичной пульсации завихренности при больших числах Рейнольдса, что не приводит к отрицательным нормальным напряжениям и нарушению неравенства Шварца для касательных напряжений, как это случается в стандартной модели [3].

Что касается k - ω моделей, то программа Fluent имеет два варианта – «стандартную» (SKO) и SST (Shear Stress Transport). В основном, они предназначены для расчета пристеночных и отрывных течений.

Для стандартной $k-\omega$ модели удельная скорость диссипации ω и турбулентная кинетическая энергия k определяются следующими уравнениями переноса:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \cdot k \cdot u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k, \quad (6.4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \cdot \omega \cdot u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega. \quad (6.5)$$

В уравнениях (6.4) и (6.5) G_k и G_ω – генерация турбулентной кинетической энергии и удельной скорости диссипации, Γ_k и Γ_ω – эффективная диффузия k и ω соответственно, Y_k и Y_ω – диссипация k и ω , S_k и S_ω – источниковые члены. Все они определяются по известным формулам, приведенным в [3].

SST $k-\omega$ модель пытается в себе сочетать точность и устойчивость «стандартной» $k-\omega$ модели в пристеночных областях и $k-\varepsilon$ модели на удалении от стенок. Уравнения переноса в таком случае следующие:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot k \cdot u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k, \quad (6.6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \cdot \omega \cdot u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega, \quad (6.7)$$

где D_ω – параметр встречной диффузии, возникающий при «сшивании» $k-\omega$ и $k-\varepsilon$ моделей.

Теперь необходимо подвести итог сравнению двухпараметрических моделей. В целом можно сказать, что они являются хорошей альтернативой другим подходам для расчетов турбулентных потоков. К тому же, в связи с постоянным усовершенствованием вычислительной мощности их требовательность к ресурсам накладывает все меньшие ограничения, по сравнению с моделями с большим числом уравнений, для их использования в решении все более широкого класса задач.

Для моделирования пристеночных течений хорошо подходит стандартная $k-\omega$ модель, но она дает грубое решение для турбулентного ядра потока. Модель SST пытается исключить данный недостаток и может применяться для околозвуковых течений и с большими и малыми числами Рейнольдса, но для качественного счета требует не менее десяти ячеек в пограничном слое, что не позволительно для вычислительных ресурсов, использованных в настоящей работе.

Серьезным недостатком устойчивой и экономичной «стандартной» $k-\varepsilon$ модели является упрощенная запись уравнения переноса скорости диссипации, из-за чего она в состоянии описывать процессы переноса энергии турбулентности лишь в областях со значительной неоднородностью (асимметричностью) потока, а для характеризующихся небольшой неоднородностью осесимметричных потоков описание процессов переноса становится достаточно грубым.

Поскольку $k-\varepsilon$ модель турбулентности является одной из основных на сегодняшний день и хорошо апробирована, то в настоящей работе используется $k-\varepsilon$ Realizable модель, которая хорошо подходит для расчета отрывных и искривленных течений вследствие более точной записи уравнения переноса для ε , и где проблема сходимости для течений с большими сдвиговыми напряжениями считается решенной.

8 Введение в газификацию твердого топлива

Поскольку на начальной стадии работы планировалось использование результатов, полученных при моделировании гидродинамики и тепломассопереноса в канале с пористой вставкой, в дальнейшем для описания процесса газификации твердого топлива, то в качестве канала было предложено использование рабочей зоны шахты газогенератора. В таком случае засыпка реальных пылеугольных частиц играет роль пористого материала при продувании его потоком воздуха. При этом задача моделирования плавно перетекает в рассмотрение проблемы двухфазного течения, где одна из взаимодействующих фаз представляется гранулированной пористой средой, а вторая – воздушной смесью.

Для начала рассмотрим основы процесса газификации. Под газификацией твердого топлива подразумевается термический процесс, при котором органическая часть топлива превращается в горючие газы в присутствии воздуха, технического кислорода, водяного пара или других газов [15]. Твердый остаток, получаемый после газификации, обычно состоит из минеральной части топлива (золы) с небольшой примесью горючего и называется шлаком. Генераторный газ может использоваться как для последующего сжигания в различных котлах, так и в камерах сгорания разнообразных двигателей.

Процесс газификации твердого топлива является по-настоящему сложным гетерогенным физико-химическим процессом, протекающим при высоких температурах, основным звеном которого является взаимодействие твердой фазы (углерода топлива) и газовой фазы (дутья). На протекание химического процесса оказывают влияние природа топлива, а также физические факторы: скорость газообразного потока, тепловой режим в слое топлива, технологическое и аппаратное оформление процесса.

При взаимодействии углерода топлива с дутьем (кислород, пар) протекают следующие основные первичные реакции [15]:

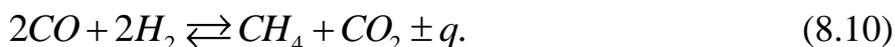
с кислородом



с водяным паром



Газообразные продукты первичных реакций вступают в свою очередь во взаимодействие с углеродом топлива, с кислородом, водяным паром и между собой. Наиболее существенными вторичными реакциями являются [15]:



Кроме того, могут протекать и другие реакции, но их участие в общем процессе газификации незначительно. Таким образом, во всех системах газификации основными газовыми компонентами получающегося газа являются CO, CO₂, CH₄, H₂, H₂O, N₂.

В формулах 8.1 – 8.10 величины q являются теплотами реакций и зависят от физических параметров процесса, названных выше.

Основным достоинством процесса газификации твердых топлив является получение газообразного топлива из низкокачественного сырья, которое может содержать большое количество минеральных примесей и влаги, в то время как при сгорании генераторного газа выделяется большее количество теплоты и незначительное количество токсичных продуктов. Сейчас для газификации могут подойти практически любые виды горючих ископаемых, также углеродсодержащие отходы в конденсированном виде с зольностью и влажностью до 50% с диапазоном гранулометрического состава

от долей до сотен миллиметров, в том числе осадки сточных и канализационных вод.

Поэтому актуальность газификации постоянно возрастает. Кроме того, разведанные запасы нефти и газа в мире значительно меньше запасов твёрдых ископаемых топлив.

Наиболее распространенным способом газификации угля, применимым в промышленном масштабе, на данный момент является газификация в плотном слое. Данный способ предусматривает медленное движение частиц вниз по шахте газогенератора под действием сил тяжести с противоточным потоком паровоздушной смеси.

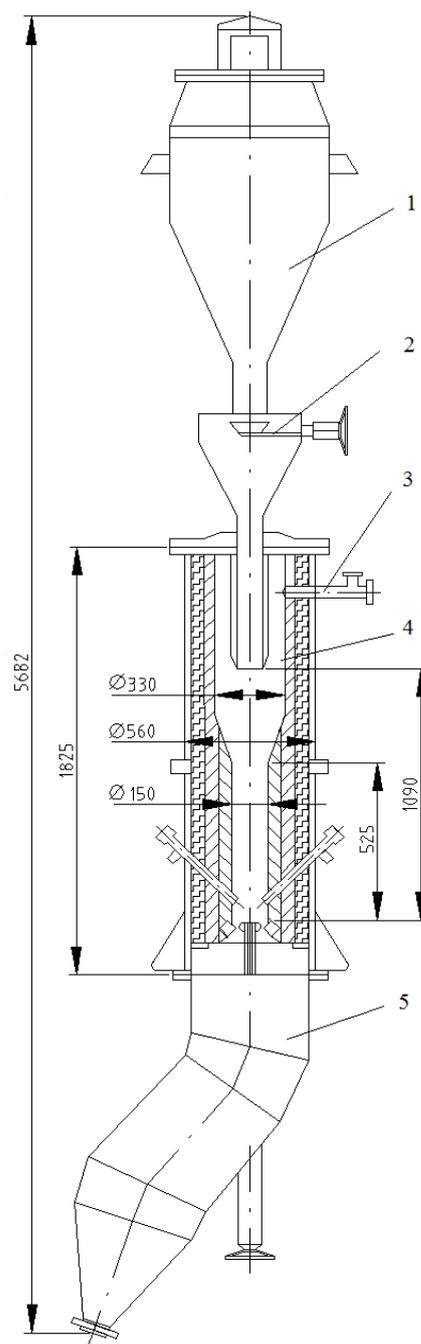
Газогенератор, рабочая зона которого моделируется в данной работе, изображен на рисунке 8.1.

Процесс газификации характеризуется встречным движением воздуха (снизу вверх) и топлива (сверху вниз), а также газов (снизу вверх). Дутьевая воздушная смесь проходит слой горящего топлива, так называемую зону горения, где происходят реакции по формулам (8.1) – (8.4). Затем продукты горения проходят через слой раскаленного топлива, имеющего высокую температуру до 1100°C – зона восстановления. Здесь при нехватке кислорода происходит восстановление углекислоты углеродом и разложение водяного пара. В то время как в зоне горения происходят экзотермические реакции и имеют место наивысшие температуры, зона восстановления потребляет тепло, вносимое в нее из зоны горения. Зоны восстановления и горения составляют зону газификации.

Над зоной восстановления располагается зона сухой перегонки, где загруженное в газогенератор топливо превращается сначала в полукоксы, а затем в кокс, а поднимающиеся снизу газы смешиваются с продуктами сухой перегонки. Еще выше располагается зона подсушки топлива, где газы смешиваются с водяными парами.

Процессы сухой перегонки и сушки топлива производятся за счет физического тепла горячих газов, поднимающихся из зоны восстановления.

Зоны сухой перегонки и подсушки вместе называются зоной подготовки топлива.



1 – бункер топлива, 2 – штыковой затвор, 3 – выход генераторного газа,
4 – газогенератор, 5 – узел выпуска шлака.

Рисунок 8.1 – Часть газогенераторной установки

Таким образом, в целом работой газогенератора является совокупность двух самостоятельных процессов – подготовки топлива и собственно газификации. Однако, трудно в действительности четко разграничить

отдельные зоны газификации: процессы, свойственные каждой зоне, в меньшей или большей степени накладываются друг на друга.

Из разных сортов топлива получается газ с различным содержанием смол и других нежелательных примесей (фенолы и пр.). Поэтому на выходе генераторный газ подвергается обработке в очистных сооружениях, состав которых зависит от целей его дальнейшего использования.

Известен также способ подземной газификации угля, когда термическое превращение в горючий газ органических веществ твёрдых ископаемых происходит в недрах земной коры на месте их залегания, а на поверхность газ выводится через буровые скважины. Но данный метод газификации в настоящей работе не затрагивается.

11 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

В условиях современности топливно-энергетический комплекс (ТЭК) России, будучи традиционно главной составляющей экономики страны, стал практически единственным источником поддержания финансово-экономической деятельности всех отраслей промышленности. Причем если нефтяная и газовая промышленности, по существу, формируют бюджет страны, то электроэнергетика, со своей стороны, фактически обеспечивает дотирование других сфер экономики, поскольку государственное регулирование тарифов на электрическую и тепловую энергию сдерживает их рост и исключает предоплату в отличие от других отраслей промышленности. За последнее десятилетие инвестиционная активность во всех отраслях ТЭК снизилась, а в электроэнергетике прямо связанный с недостатком материальных средств износ основных фондов достиг размеров, угрожающих энергетической безопасности страны.

С учетом большой капиталоемкости отрасли и длительных сроков возврата средств большое внимание должно уделяться методическим вопросам технико-экономических расчетов, прежде всего системе показателей эффективности производства, общей и сравнительной эффективности капиталовложений, обоснованию оптимального варианта проектного решения.

Ввиду ограниченности запасов природного топлива на планете газификация угля, как источник получения альтернативного топлива, становится приоритетным направлением развития энергетики. Наиболее распространенным и актуальным способом газификации угля, применимым в промышленном масштабе, на данный момент является газификация в плотном слое.

Данная выпускная квалификационная работа имеет теоретическую направленность и представляют собой научно-исследовательскую работу по

изучению тепломассопереноса в канале шахты газогенератора, засыпка угля в котором считается пористой вставкой.

Для таких работ экономическая часть представлена в виде определения затрат на проведение НИР.

Для отражения цели работы и понимания того, что необходимо сделать для ее достижения, составим диаграмму Исикавы (Cause-and-Effect-Diagram). Это графический метод анализа и формирования причинно-следственных связей, инструментальное средство для систематического определения причин проблемы и последующего графического представления [18].

Построение диаграммы начинаем с формулировки цели работы, которая является объектом анализа, и наносим ее на центральную горизонтальную стрелку диаграммы. Затем выявляем факторы, влияющие на объект анализа, и подводим их к центральной стрелке (Рисунок 11.1).

В рамках данного раздела также необходимо определить ключевые события проекта и оценить время, необходимое для их выполнения. Данную информацию сводим в таблицу 11.1.



Рисунок 11.1 - Диаграмма Исикавы

Таблица 11.1 – Перечень работ

Наименование работ	Состав исполнителей	Продолжительность, дней
Получение задания	Инженер	1
Обзор литературы	Инженер	30
Установка спец. ПО	Научный руководитель	1
Проведение верификационного расчета	Инженер	3
Проведение тестовых расчетов	Инженер	10
Составление письменных отчетов	Инженер	5
Консультации, собеседования	Научный руководитель	10
Проведение основных расчетов	Инженер	14
Написание и перевод статей	Инженер; научный руководитель	10; 3
Подготовка и участие в конференциях	Инженер	4
Написание раздела «Социальная ответственность»	Инженер	5
Написание раздела «Финансовый менеджмент»	Инженер	5
Заключение, обобщение результатов	Инженер	3
Оформление пояснительной записки ВКР	Инженер	7
Итого:	Инженер	97
	Научный руководитель	14

Смета затрат на проект складывается из следующих составляющих

$$K_{\text{пр}} = U_{\text{мат}} + U_{\text{ам}} + U_{\text{зп}} + U_{\text{со}} + U_{\text{накл.}}$$

А) Материальные затраты, складывающиеся из канцелярских принадлежностей, составляют $U_{\text{мат}} = 700$ руб.

Б) Амортизационные отчисления по оборудованию, использовавшемуся при проведении исследовательских работ

$$U_{\text{ам}} = \frac{T_{\text{исп.кт}}}{T_{\text{кал}}} C_{\text{кт}} \frac{1}{T_{\text{сл}}} = \frac{67}{365} 25 \frac{1}{8} = 0,574 \text{ т.р.};$$

где $T_{\text{исп.кт}} = 67$ дней – время использования компьютерной техники (КТ);

$T_{\text{сл}} = 8$ лет – срок службы КТ;

$C_{\text{кт}} = 25$ т.р. – стоимость КТ;

$T_{\text{кал}} = 365$ дней.

В) Заработная плата $U_{\text{зп}}$

Инженер: $U_{\text{зп}}^{\text{мес}} = 3\Pi_0 \cdot K_1 \cdot K_2 = 14,5 \cdot 1,1 \cdot 1,3 = 20,735 \text{ т.р.};$

где $3\Pi_0 = 14,5$ т.р. – месячный оклад инженера 10 разряда;

$K_1 = 1,1$ (10 %) – коэффициент, учитывающий отпуск;

$K_2 = 1,3$ (30 %) – районный коэффициент;

$$U_{\text{зп}}^{\text{ф.инж.}} = \frac{U_{\text{зп}}^{\text{мес}}}{21} n = \frac{20,735}{21} 97 = 95,78 \text{ т.р.};$$

где n – количество отработанных дней по факту.

Научный руководитель:

$$U_{\text{зп}}^{\text{мес}} = (3\Pi_0 \cdot K_1 + Д) \cdot K_2 = (27 \cdot 1,1 + 2,5) \cdot 1,3 = 41,86 \text{ т.р.},$$

где $3\Pi_0 = 27$ т.р. – месячный оклад преподавателя 16 разряда;

$Д = 2,5$ т.р. – доплата за интенсивность труда.

$$U_{\text{зп}}^{\text{ф.НР}} = \frac{U_{\text{зп}}^{\text{мес}}}{21} n = \frac{41,86}{21} 14 = 27,91 \text{ т.р.};$$

Фактическая заработная плата

$$\Phi.ЗП = U_{ЗП}^{\Phi.инж.} + U_{ЗП}^{\Phi.НР} = 95,78 + 27,91 = 123,69 \text{ т.р.}$$

Г) Отчисления на социальные нужды во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.) равны 30% от фактической заработной платы

$$U_{со} = 0,3 \cdot 123,69 = 37,107 \text{ т.р.}$$

Д) Накладные расходы $U_{накл.}$ составили около 80 % от Ф.ЗП;

$$U_{накл} = 0,8 \cdot 123,69 = 98,952 \text{ т.р.}$$

Таблица 11.2 – Смета затрат

Элементы затрат	Стоимость, т.р.
Материальные затраты	0,7
Амортизация	0,574
Заработная плата	123,69
Социальные отчисления	37,107
Накладные расходы	98,952
Итого	261,023

В данной дипломной работе рассматривается численное моделирование нестационарных процессов гидродинамики и тепломассопереноса в шахте газогенератора. Поскольку процесс трансформации углей в газ является трудоемким как теоретически, так и экспериментально, то математическое моделирование процесса газификации твердого топлива представляет собой важную задачу, так как может быть применено для определения характеристик процесса на этапе проектирования. При этом можно получить генераторный газ заданного химического состава или заданной теплоты сгорания, так как эти показатели определяются выбранной схемой газификации, а также температурой, давлением и составом применяемых газифицирующих агентов.

Таким образом, экономический эффект от разработки надежной математической модели данных процессов достигается за счет отсутствия

затрат на экспериментальные установки и снижения затрат на издержки при строительстве и монтаже оборудования. Кроме того, это позволит уменьшить сроки проектирования газогенераторных установок.

Однако, полноценные экономические расчеты подобного рода, связанные с определением капитальных расходов и описанного экономического эффекта, выходят за рамки данного раздела.

Список публикаций студента

1. P.V. Openyshev. Influence of a porous insert on the fluid flow inside the gasifier shaft / M.A. Sheremet. Key Engineering Materials, vol. 685, pp. 235–239, 2016.
2. P.V. Openyshev. Influence of the tilt angle of lances on the fluid flow inside the gasifier shaft / M.A. Sheremet. European Physical Journal (during checking stage).