**«Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»**

**(БГТУ «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»)**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Факультет |  | А |  | Ракетно-космической техники |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Кафедра |  | А9 |  | Плазмогазодинамика и теплотехника |
|  |  | шифр |  | наименование |
| Дисциплина |  | Численное моделирование в теплоэнергетике и гидроаэродинамике | | |

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

на тему

|  |
| --- |
| Интенсификация теплообмена в тепловой трубке |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Выполнил студент группы | | | |  | | А942 |
| Вихрова И.А. | | | | | | |
| Фамилия И.О. | | | | | | |
| **РУКОВОДИТЕЛЬ** | | | | | | |
| Федосенко Н.Б. | |  |  | | | |
| Фамилия И.О. Подпись | | | | | | |
| Оценка |  | | | |  | |
| «\_\_\_\_\_» |  | | | | 20\_\_\_\_ г. | |

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2017г.

СОДЕРЖАНИЕ

|  |  |
| --- | --- |
| Реферат…………………………………………………………………….. | 3 |
| Нормативные ссылки…………………………………………………....... | 4 |
| Список условных обозначений………………………………………....... | 5 |
| Введение…………………………………………………………………… | 7 |
| 1Физические процессы, происходящие в тепловых трубках…….………………………………………………………………..  1.1Кипение в трубах…………………………………………………….  1.2 Расчет теплообмена при кипении в трубах…………………......... | 9  10 | |
| 2 Математическая модель……………………………………………....... | 13 |
| 3 Вычислительное моделирование……………………………………….  3.1 Постановка задачи в Ansys ………………………………………. | 19  19 |
| 3.2 Анализ полученных результатов ………………….......................... | 23 |
| Заключение………………………………………………………………… | 28 |
| Список используемой литературы……………………………………….. | 29 |

РЕФЕРАТ

Пояснительная записка \_\_\_\_\_\_\_\_ стр., \_\_\_\_\_\_\_\_ рис., \_\_\_\_\_\_\_\_ табл., \_\_\_\_\_\_\_\_ источников, CD диск с презентацией

ТЕПЛОВАЯ ТРУБКА, КИПЕНИЕ, ТЕПЛООБМЕН, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Целью данного курсового проекта является изучение процесса моделирования задач с кипением в вычислительном пакете ANSYS CFX.

Решена задача моделирования кипения в тепловой трубке, получена визуализация динамики происходящих процессов, выполнен анализ полученных результатов.

Основные этапы курсового проектирования:

1. Аналитический обзор имеющихся теоретических и экспериментальных материалов по тематике курсового проектирования;
2. Математическое моделирование исследуемого явления;
3. Постановка и выполнение вычислительных экспериментов;
4. Анализ результатов.

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей пояснительной записке использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 7.1—84 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическое описание документа. Общие требования и правила составления

ГОСТ 8.417—81 Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы физических величин

ГОСТ 7.32—2001 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления

ГОСТ 7.54 Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Представление численных данных о свойствах веществ и материалов в научно-технических документах. Общие требования.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Латинские символы:

– константы

коэффициент температуропроводности, м2/с

– удельная теплоемкость при постоянном давлении, Дж/(кг·К)

диаметр парового пузыря, мм

частота зародышеобразования, Гц

– ускорение силы тяжести, м/с2

– число активных центров парообразования, шт.

– тепловой поток,

– размер шероховатостей на поверхности нагрева, м

– теплота парообразования, Дж/кг

– площадь тепловыделяющей поверхности, м2

– температурный напор, °С

– время, с

– время ожидания повторного появления парового пузыря на поверхности, с

время роста и конденсации парового пузыря, с

Греческие символы:

– коэффициент теплопроводность,

– динамическая вязкость,

𝜈 – кинематический коэффициент вязкости, м2/с

*ρ*– плотность

– коэффициент поверхностного натяжения, Н/м

*θ* – угол смачиваемости, град.

Индексы:

*п* – пар;

*ж*– жидкость;

*нас*– на линии насыщения;

*н*– нагревательная поверхность;

*нк*– начало кипения;

*отр* – в момент отрыва от поверхности

ВВЕДЕНИЕ

Кипение, как и испарение являются наиболее эффективным способами охлаждения. Режимы испарения и кипения в тонких пленках обеспечивают при малых расходах жидкости и низких температурных напорах высокую интенсивность теплообмена. Компактные испарители с пленочным течением жидкости находят применение в дистилляционных установках, системах охлаждения и термостабилизации, в крупномасштабных аппаратах по ожижению природного газа, в пищевой промышленности и т. д. Если теплообмен при испарении стекающей пленки жидкости изучен достаточно всесторонне, то зависимости, позволяющие достоверно описывать опытные данные по теплообмену при кипении в широком диапазоне изменения режимных параметров, на настоящий момент отсутствуют [1]. Это относится как к теплообмену в пленке при кипении насыщенной жидкости, так и к теплообмену в жидкости, поступающей на поверхность тепловыделения при температуре ниже температуры насыщения (недогретой жидкости).

Режим пузырчатого кипения воды наблюдается в современных паровых котлах на тепловых электростанциях для получения пара с высокими значениями давления и температуры. Простейшим объектом исследования, в котором присутствует выше описанный физический процесс, является тепловая трубка. Тепловая трубка это элемент системы охлаждения, широко используемый в современной технике. Принцип работы состоит в том, что в замкнутом объеме находится легко испаряющаяся жидкость, которая испаряется на одном конце и конденсируется на другом. Эффективность тепловой трубки определяется скоростью возврата сконденсировавшейся жидкости обратно в зону испарения и свойствами теплоносителя. Для интенсификации возврата жидкости в зону испарения используются пористые фитили или канавки на внутренней поверхности трубки.

Еще один подход к увеличению эффективности тепловых трубок состоит в разработке теплоносителя с заданными свойствами. В этом направлении стремятся создать теплоноситель, у которого поверхностное натяжение будет возрастать с ростом концентрации вещества. В этом случае помехой является эффект кризиса кипения, когда пленочное кипение может переходить в пузырьковое и наоборот. Наличие кризиса кипения приводит к изменению механизма теплоотдачи. Переход от пузырькового к пленочному режиму приводит к внезапному резкому изменению интенсивности теплоотдачи и увеличению температуры теплоотдающей поверхности. Поиск возможности контроля этого эффекта является перспективным направлением развития.

Еще одним преимуществом является возможность увеличения скорости возврата потока из зоны конденсации в зону испарения. В литературе широко известны методы интенсификации теплообмена в кипящих потоках в парогенерирующих трубах энергоустановок такие как закрутка потока с помощью лент, шнеков, винтовых туб или профилирования внутренней поверхности канала. Все эти методы хорошо работают при наличии расхода теплоносителя. В случае с тепловой трубкой имеется запаянный объем с фиксированным количеством теплоносителя.

Данная работа посвящена анализу способов интенсификации теплообмена за счет взаимовлияния рядом расположенных трубок.

1ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ТЕПЛОВЫХ ТРУБКАХ

В главе представлен обзор литературы [2-4] по тематике исследования.

* 1. КИПЕНИЕ ВТРУБАХ

Кипение — процесс интенсивного парообразования, который происходит в жидкости, как на свободной её поверхности, так и внутри её структуры. При этом в объёме жидкости возникают границы разделения фаз, то есть на стенках сосуда образуются пузырьки, которые содержат воздух и насыщенный пар.

В энергетических установках процесс кипения часто реализуется как кипение в трубах. Жидкость (возможно, недогретая до температуры насыщения) подается в обогреваемый снаружи канал и последовательно проходит через несколько характерных зон (рисунок 1.1.1):

1. зону подогрева до температуры насыщения (экономайзерный участок);
2. зону пузырькового кипения с увеличивающимся паросодержанием потока, вплоть до перехода к дисперсно – кольцевому течению по достижении плотной упаковки пузырьков;
3. зону испарения кольцевой пленки при дисперсно–кольцевом течении;
4. зону испарения дисперсной влаги в ядре потока;
5. зону перегрева однофазного парового потока на выходе из канала.

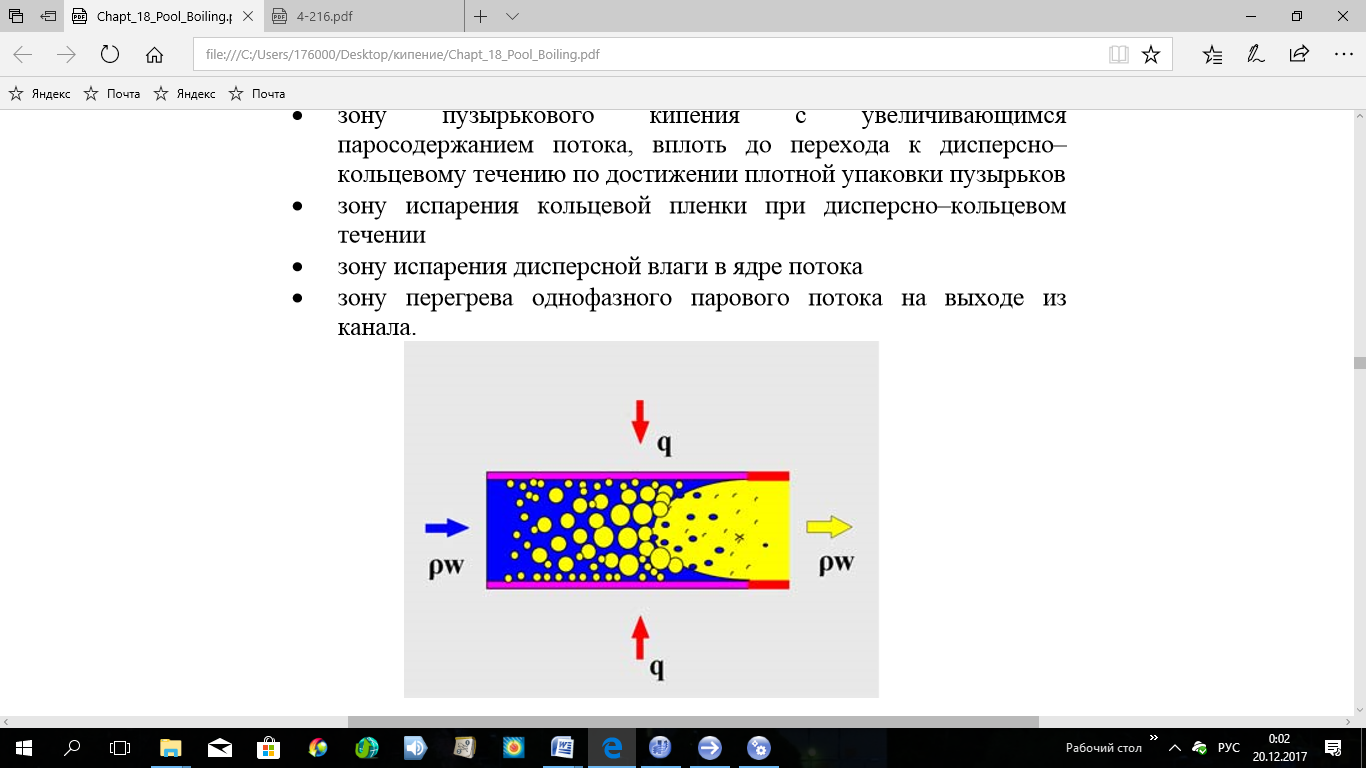


Рисунок 1.1.1 - Кипение в трубе

Как и при кипении в большом объеме, возможен переход от пузырькового к пленочному кипению (кризис первого рода). Специфическим является кризис второго рода – кризис высыхания пленки при дисперсно-кольцевом режиме. Расчет кипения в трубах представляет сложную задачу, вследствие многообразия форм двухфазного потока. Основными влияющими параметрами являются давление, длина и диаметр канала, массовая скорость, плотность теплового потока, теплофизические свойства теплоносителя. Задачей расчета является идентификация режимов по длине канала, расчет теплоотдачи и температуры стенки канала, расчет гидравлического сопротивления, диагностика кризисов кипения.

1.2 РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КИПЕНИИ В ТРУБАХ

Теплообмен в докризисной зоне.

При кипении в трубах необходимо учитывать два фактора, определяющих интенсивность теплопереноса от стенки к жидкости:

1. собственно процесс пузырькового кипения с интенсивным перемешиванием жидкости у стенки быстрорастущими пузырьками пара
2. конвекция при вынужденном движении теплоносителя в канале.

Количественной мерой влияния этих факторов на результирующую интенсивность теплообмена α являются соответственно:

1. - коэффициент теплоотдачи при пузырьковом кипении в большом объеме, то есть при отсутствии вынужденного движения;
2. - коэффициент теплоотдачи при вынужденном течении в отсутствии кипения.

Имеются две очевидные предельные ситуации:

1. если
2. если

Первый случай реализуется при больших значениях теплового потока к кипящей жидкости и относительно малой скорости вынужденного движения, второй – при больших значениях скорости и относительно малых тепловых потоках. Для промежуточной ситуации можно найти подходящую интерполяцию между этими предельными случаями, например:

|  |  |
| --- | --- |
| . | *(1)* |

Для расчета величины можно использовать формулу Лабунцова для пузырькового кипения в большом объеме:

|  |  |
| --- | --- |
| . | *(2)* |

Для расчета при турбулентном режиме течения двухфазной смеси можно использовать соотношение, полученное по гомогенной модели

|  |  |
| --- | --- |
| , | *(3)* |

где

|  |  |
| --- | --- |
|  | *((4)* |
| – массовая скорость. |  |

Теплообмен в закризисной зоне.

В закризисной зоне структура двухфазного потока следующая. Непрерывной фазой, контактирующей с обогреваемой стенкой, является пар. Мелкие взвешенные капли жидкости движутся в ядре потока. Поэтому для расчета коэффициент теплоотдачи можно воспользоваться формулой:

|  |  |
| --- | --- |
| *,* | *(5)* |

где

|  |  |
| --- | --- |
| . | *(6)* |

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

# 2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Интенсивность теплообмена при кипении зависит от многих факторов, в том числе от локальных характеристик кипения, к которым относят такие параметры, как скорость роста паровых пузырей, отрывной диаметр пузыря, частота зародышеобразования, температурный напор и число центров парообразования. На сегодняшний день существует популярный подход к описанию теплообмена при кипении жидкости – так называемая RPI-модель, учитывающая вклад различных составляющих передачи тепла.

RPI-МОДЕЛЬ

В данной модели предполагается, что суммарный тепловой поток, передающийся при кипении жидкости, является суммой различных составляющих:

|  |  |
| --- | --- |
| , | *(7)* |

где – тепло, затрачиваемое на испарение жидкости в паровые пузыри:

|  |  |
| --- | --- |
| ; | *(8)* |

– тепло, затрачиваемое на повторное формирование разрушенного после отрыва пузырей пограничного слоя:

|  |  |
| --- | --- |
| ; | *(9)* |

– тепло, передающееся жидкости за счет конвекции на поверхности, свободной от пузырей (рис. 1):

|  |  |
| --- | --- |
| . | *(10)* |

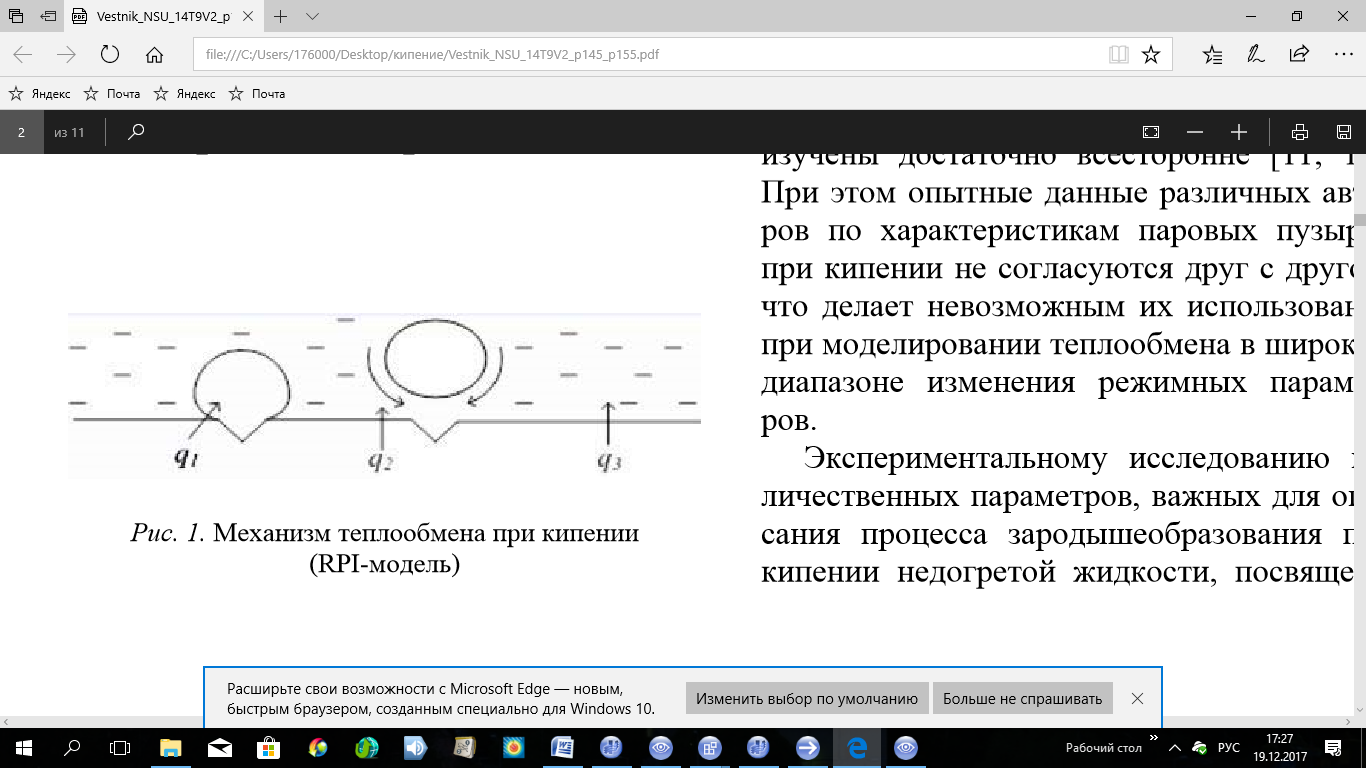


Рисунок 2.1.1 - Механизм теплообмена при кипении (RPI-модель)

В работе [1] были получены локальные характеристики кипения, используемые в данной модели, на основе которых было произведено сравнение экспериментальных данных по теплообмену при кипении насыщенной жидкости в условиях большого объема с величинами, полученными из расчета по RPI-модели. Сравнение показало, что опытные данные по теплообмену при кипении с хорошей точностью могут быть описаны RPI-моделью с использованием локальных характеристик, полученных в [1]. Также было показано, что основной вклад вносит компонента, связанная с повторным формированием разрушенного в результате отрыва пузырей пограничного слоя (). Таким образом, важной задачей для моделирования теплообмена при кипении является изучение локальных характеристик кипения. Основное внимание уделяется изучению геометрических характеристик паровых пузырей, скорости их роста, а также частоте их отрыва от тепловыделяющей поверхности. Несмотря на то что на данный момент существует много работ, направленных на исследование кипения недогретой жидкости, некоторые фундаментальные параметры, такие как частота зародышеобразования и температурный напор, соответствующий появлению пузырей, не изучены в достаточной степени.

Максимальный диаметр паровых пузырей перед конденсацией

Cущественное влияние на максимальный размер паровых пузырей перед конденсацией в пленке оказывает степень недогрева жидкости. Максимальный диаметр паровых пузырей перед конденсацией увеличивается с ростом теплового потока.

Методом сидящей капли в работе [1] было определено значение контактного угла смачивания поверхности нагревателя дистиллированной водой (), что позволило провести сравнение полученных экспериментальных данных по размерам паровых пузырей в стекающей пленке воды с зависимостью :

|  |  |
| --- | --- |
|  | *(11)* |

Так же существует эмпирическая модель:

|  |  |
| --- | --- |
|  | *(12)* |

где – безразмерный параметр:

|  |  |
| --- | --- |
| , | *(13)* |

где число Якоба, число Прандтля.

Опытные данные по максимальному диаметру парового пузыря в пленке жидкости перед конденсацией для различных степеней недогрева жидкости лежат существенно ниже значений отрывного диаметра парового пузыря, полученных по зависимости (11) для кипения жидкости в условиях большого объема. Максимальный диаметр пузыря перед конденсацией и отрывной диаметр увеличиваются с ростом степени перегрева тепловыделяющей поверхности. В области малых перегревов жидкости опытные данные по максимальному диаметру пузыря близки к величинам отрывного диаметра парового пузыря, полученным при кипении воды в условиях большого объема на линии насыщения, а также согласуются с данными, полученными с использованием зависимости (12).

Частота зародышеобразования

Частота зародышеобразования является важной характеристикой при описании теплообмена при кипении с использованием RPI-модели, определяющей тепло, затрачиваемое на испарение жидкости в паровые пузыри, и тепло, необходимое для повторного формирования пограничного слоя после отрыва паровых пузырей. Анализ полученных в работе [1] данных позволил определить характерную частоту зародышеобразования для различных плотностей теплового потока с использованием следующего выражения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | *(14)* |

Опытные данные по частотам зародышеобразования как для кипения в условиях большого объема, так и при кипении в пленке жидкости существенно зависят от плотности теплового потока. При этом частота зародышеобразования не зависит от степени недогрева жидкости. Исследование временных характеристик кипения показало, что во всей области тепловых нагрузок, особенно в области малых тепловых нагрузок , т. е. основной вклад при вычислении частоты зародышеобразования по формуле (14) вносят времена ожидания начала кипения. Время ожидания повторного появления паровых пузырей может быть оценено из следующего выражения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | *(15)* |

где– перегрев тепловыделяющей поверхности, соответствующий появлению парового пузыря. Время ожидания повторного появления паровых пузырей значительно уменьшается с ростом плотности теплового потока, что и приводит к увеличению частоты зародышеобразования. Более слабая зависимость от в области высоких тепловых нагрузок связана с тем, что в этой области времена ожидания повторного появления пузырей и времена их роста и конденсации становятся соизмеримыми. Такая же тенденция наблюдается при отрыве пузырей от поверхности нагрева при кипении насыщенной жидкости в условиях большого объема. Поэтому в данной области тепловых нагрузок необходимо учитывать время роста пузыря до отрыва или конденсации, ключевую роль при описании которого играет величина отрывного или максимального диаметра парового пузыря.

Температура парообразования

Температура тепловыделяющей поверхности в момент появления паровых пузырей является ключевым параметром, необходимым для описания теплообмена по RPI-модели. В литературе при описании температуры закипания жидкости используют известное соотношение Янга – Лапласа. В то же время, как показывают экспериментальные данные настоящей работы, при использовании тонкостенных малоинерционных нагревательных поверхностей необходимо учитывать  зависимость температуры вскипания от плотности теплового потока. Существует выражение для описания температуры инициации паровых пузырей в виде

|  |  |
| --- | --- |
|  | *((16)* |

Как видно из этого выражения, для выявления температуры вскипания необходимо знание топографии тепловыделяющей поверхности и характерных размеров шероховатостей.

Для каждой из фаз вводится переменная , характеризирующая в каждом контрольном объёме объёмную долю каждой фазы, таким образом означает что в данном контрольном объёме отсутствует фаза , что присутствует смесь фазы c какой либо другой.

Отслеживание поверхности раздела между фазами осуществляется путем решения уравнения неразрывности для объемной доли каждой фазы. Для фазы это уравнение имеет следующий вид[5]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | *(17)* |

где – поток переноса массы из фазы в фазу – поток переноса массы из фазы в фазу , – поток из источника массы любой из фаз.

Уравнение энергии, также разделяемое между фазами, показано ниже:

|  |  |
| --- | --- |
|  | *(18)* |

|  |  |
| --- | --- |
|  | *(19)* |

учитывает вклад от излучения, а также от любых других объемных источников тепла.

3 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

3.1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ В ANSYS

На начальном этапе в курсовом проекте моделируется тестовая задача.

Вертикальная трубка диаметром и высотой нагревается тепловым потоком с внешеней стороны . Заданы давление = 4.5 МПа, массовый расход жидкости и температура жидкости .

Геометрия, а точнее ее фрагмент с нанесенной расчетной сеткой представлен на рисунке 3.1.1. А результат распределения пара по трубе представлен на рисунке 3.1.2.

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 3.1.1 – Фрагмент геометрии с расчетной сеткой |

|  |
| --- |
| Unnamed_1.jpg |
| Рисунок 3.1.2 – Картина распределения пара по длине трубки |

На основе результатов, полученных после решения тестовой задачи моделировался некий ограниченный объем между тремя тепловыми трубками. Расчетная геометрия выполнена в виде вертикального многогранника, разделенного на “горячую” зону – три грани (1), “холодную” – три другие грани (2), и “стенку” сверху и снизу (3).   
Геометрические характеристики и начальные условия такие же, как и в тестовой задаче. Сетка выполнена неструктурированной ортогональной. Содержит 150 тысяч ячеек. Геометрия и ее фрагменты представлены на рисунке 3.1.3…3.1.5.

|  |
| --- |
| aT7QKWzT6foghh.jpg |
| Рисунок 3.1.3 – Геометрия расчетной области |

|  |
| --- |
| Gx3ZYoOlq0gвву.jpg |
| Рисунок 3.1.4 – Фрагмент расчетной области |

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 3.1.5 – Геометрия. Вид сверху |

3.2 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты динамики процесса образования пара в межтрубном пространстве представлены на рисунке 3.2.1.

|  |
| --- |
| 650_1.jpg |
| Рисунок 3.2.1 – Динамика процесса образования пара в межтрубном пространстве |
|  |

Результаты на разных высотах по длине труб подробнее показаны на рисунке 3.2.2 … 3.2.7.

|  |
| --- |
| 650_0.3metra.jpg |
| Рисунок 3.2.2 – Динамика процесса образования пара на высоте 0.3 м |

|  |
| --- |
| 650_0.8metra.jpg |
| Рисунок 3.2.3 - Динамика процесса образования пара на высоте 0.8 м |

|  |
| --- |
| 650_1metra.jpg |
| Рисунок 3.2.4 - Динамика процесса образования пара на высоте 1 м |

|  |
| --- |
| 650_1.5metra.jpg |
| Рисунок 3.2.5 - Динамика процесса образования пара на высоте 1.5 м |

|  |
| --- |
| 650_1.7metra.jpg |
| Рисунок 3.2.6 - Динамика процесса образования пара на высоте 1.8 м |

|  |
| --- |
| 650_2metra.jpg |
| Рисунок 3.2.7 - Динамика процесса образования пара на высоте 2 м |

Происходит нагрев трубок и в пространстве между ними образуется пар. Видна динамика этого процесса и влияние взаимного расположения этих трубок на теплообмен.

Из-за того, что в данной работе рассматривается подсеточная модель, на рисунке 3.2.1 не видно образования пузырей, как на рисунке 3.2.8 и как это должно быть в реальных условиях, а видно только общее распределение плотности пара.

|  |
| --- |
|  |

Рисунок 3.2.8 – Картина образования пара

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено исследование и моделирование задачи с кипением и испарением, изучены более подробно модели кипения и проведен анализ влияния взаимного расположения тепловых трубок на теплообмен.

Продемонстрированы этапы разработки модели в программной среде Ansys CFX и результаты расчетов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сердюков В. С., Суртаев А. С., Володин О. А. Исследование динамики парообразования при кипении в стекающих недогретых пленках жидкости / Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 2. C. 145–155.
2. Солодов А.П. Электронный курс тепломассообмена. Открытое образование. 2013, - 120 с.
3. Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.И. Леонтьев, И.И. Федик, Л.П. Холпанов. Интенсификация тепло- и массообмена на макро-, микро- и наномасштабах /Москва, ФГУП «ЦНИИАТОМИНФОРМ», 2008,- 532 с.
4. Гл. ред. А. М. Прохоров. Кипение / Большая советская энциклопедия: [в 30 т.]. — 3-е изд. — М.: Советская энциклопедия, 1969—1978.
5. Ansys Help 5.13.4, The Thermal Phase Change Model