**«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 |  | Аэрогидрогазодинамика | | |

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

на тему

|  |
| --- |
| Моделирование динамики пузыря |

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

2017г.

СОДЕРЖАНИЕ

|  |  |
| --- | --- |
| Реферат………………………………………………………………….. | 3 |
| Нормативные ссылки…………………………………………………... | 4 |
| Список условных обозначений………………………………………... | 5 |
| Введение………………………………………………………………… | 6 |
| 1 Обзор литературы по тематике исследования……………………. | 7 |
| 2 Математические модели……………………………………………... | 12 |
| 2.1 Аналитическое описание движения воздушного пузыря, всплывающего в вязкой жидкости……………………………............. | 12 |
| 2.2 Описание математической модели, используемой в Ansys Fluent…………………………………………………………………… | 16 |
| 3 Вычислительное моделирование…………………………………….  3.1 Постановка задачи в Ansys ……………………………………. | 17  17 |
| 3.2 Анализ полученных результатов …………………..................... | 19 |
| Заключение……………………………………………………………… | 23 |
| Список используемой литературы…………………………………….. | 24 |

РЕФЕРАТ

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

ДИНАМИКА ПУЗЫРЯ, БАРБОТИРОВАНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Цель курсового проекта - исследование динамики движения одиночного воздушного пузыря в объеме жидкости при его всплытии.

Объектом исследования является воздушный пузырь, всплывающий из глубины жидкости.

Предметом исследования являются параметры движения воздушного пузыря, всплывающего в вязкой жидкости.

Задачи курсового проектирования:

1. Изучить теорию исследуемого явления
2. Дать математическое описание исследуемого явления
3. Экспериментально исследовать характер движения всплывающего пузырька
4. Проанализировать полученные результаты.

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

**– изобарная теплоёмкость, Дж/(кг· К);**

**– изохорная теплоёмкость, Дж/(кг· К);**

- газовая постоянная, Дж/(кг· К);

**– полная энергия, Дж;**

**–полная энтальпия, Дж/кг;**

– молярная масса, г/моль;

*r –* радиус шарика, м

- скорость движения шарика, м/с

– давление, Па;

**– тензор скоростей деформаций;**

– универсальная абсолютная температура, К;

– объем газа, м3;

**– время, с;**

**– тепловой поток, Вт/м2;**

*u, v, w* – компоненты вектора скорости, м/с;

Греческие символы

μ – масса газа, кг;

**– тензор вязких напряжений;**

*ρ* **–**  плотность, кг/м3;

*ρ0 –* плотность шарика, кг/м3

υ **–**  удельный объем, м3/кг;

**– оператор Лапласа;**

ɳ - коэффициент вязкости

 -коэффициент затухания

 - собственная частота колебаний, Гц

ВВЕДЕНИЕ

Жидкости с пузырьками газа (пара) или каплями другой жидкости находят широкое применение в технологических процессах. Насыщенные пузырьками среды активно взаимодействуют со стенками аппаратов и машин, а также с препятствиями, унося с собой твердые частички вещества. Экспериментальные данные показали, что пузырьковое облако в жидкости ведет себя практически так же, как одиночный пузырек [1]. Исследование динамики пузырей в жидкости приобретает особый интерес в том случае, когда размеры пузырька сравнимы с размерами области течения. При таких режимах поведение пузыря до конца по-прежнему не изучено.

Задача о динамике пузыря относится к классу задач со свободными границами, которые бурно развиваются последние годы, что связано с огромным прикладным значением достижений в этой области. Однако аналитические исследования подобных задач весьма затруднительны, так как даже в рамках модели идеальной жидкости наличие свободной границы приводит к существенно нелинейным результатам. Кроме того, на свободной границе, как правило, задаются нелинейные краевые условия.

В настоящее время расчет пространственных многофазных задач и анализ результатов остаются достаточно сложным и трудоемким процессом. Известно всего несколько работ [2 - 4] посвященных исследованию эволюции пространственных пузырей, более подробно они рассмотрены ниже, в первой главе.

Основная цель данной работы - изучить поведение пространственного пузыря при его эволюции под действием силы Архимеда, силы тяжести, поверхностного натяжения.

1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ ПО ТЕМАТИКЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В главе проведен обзор работ, посвященных решению задач о движении газового пузыря в жидкости.

Процесс, исследуемый в рамках курсового проектирования, называется барботированием, это продавливание пузырьков газа через слой жидкости. При барботировании создается большая межфазная поверхность на границе жидкость – газ, что способствует интенсификации тепло - и массообменных процессов, а также более полному химическому взаимодействию газов с жидкостями.

Простейшее устройство для барботирования – труба, опущенная в резервуар с жидкостью, через которую поступает сжатый до нужного давления газ. Во избежание ударов струи газа о днище нижний конец трубы загнут. Для более равномерного и эффективного барботирования используют несколько горизонтально расположенных труб, имеющих отверстия диаметром 3 – 6 мм. При абсорбции и ректификации барботирование происходит на тарелках, так называемых барботажных колонн.

Барботирование актуально в наши дни и очень широко применяется во многих отраслях народного хозяйства:

1. Водоподготовка и очистка сточных вод;
2. [Перемешивание](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D1%88%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D0%B5), подогрев или другие технологические обработки расплава или раствора для химически агрессивных сред выгоднее, чем механические перемешиватели;
3. Смешивание [растворителя](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C) с газом;
4. Другие процессы [абсорбции](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B1%D1%81%D0%BE%D1%80%D0%B1%D1%86%D0%B8%D1%8F), [ректификации](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%B8%D1%84%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F), [флотации](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%BB%D0%BE%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F).

В работе [1] описана лабораторная методика получения и исследования воздушных пузырей заданного объёма вначале до 2,5 см и позднее до 1 литра и более. Данная методика является модификацией способа получения крупных приближенно сферических воздушных пузырей в воде, с помощью которой моделировался подъём облака сильного взрыва в атмосфере. Результаты таких экспериментов позволяют получить более детальную информацию о начальной стадии подъёма воздушного пузыря, механизме трансформации его в вихревое кольцо и некоторых связанных с этим явлением эффектах.

Установка представляет собой канал квадратного сечения со стенками из оконного стекла (рисунок 1.1). Основанием служит пластина из текстолита.

|  |
| --- |
| http://www.videoscan.ru/store_img/magazine/16/pyz4_pic1.jpg |
| Рисунок 1.1 – Общий вид установки |

В основании находится устройство для получения пузырей (рисунок 1.2). Основная его часть – корпус медицинского шприца. Корпус шприца закреплен в пластине. На верхней части шприца скотчем закреплен небольшой кусок резины. В нижнюю часть шприца вставляется пробка из оргстекла, в которую в свою очередь загоняется герметизирующая резинка, сделанная из ластика. Сбоку в корпус шприца ввинчивается штуцер, соединенный через шланг с автомобильным насосом. В резинку вставляется игла нужной длины.

|  |
| --- |
| http://www.videoscan.ru/store_img/magazine/16/pyz4_pic2.gif |
| Рисунок 1.2 – Устройство для получения пузырей. |

При проведении эксперимента надувался пузырь из резины нужного размера. Далее резиновая оболочка прорывалась иглой в полюсе; при этом остатки оболочки соскальзывают вдоль поверхности раздела вода-воздух, образуя пузырь воздуха.  Подъём пузыря и возникающее при этом течение регистрировались скоростной видеокамерой VS-FAST с частотой 500 кадров в секунду.

На рисунке 1.3 приведены кадры видеограммы подъема пузыря объемом 0.15 л, полученные при помощи скоростной камеры. В первый момент растянутая резиновая оболочка пузыря после прокола её иглой в полюсе стягивается за время 1мс, «обнажая» пузырь воздуха.

|  |
| --- |
| http://www.videoscan.ru/store_img/magazine/16/pyz4_pic3.gif |
| Рисунок 1.3 – Скоростная (500к/с) съемка процесса подъёма и образования вихревого кольца из пузыря воздуха объёмом 0.15 л. |

При этом поверхность пузыря оказывается возмущённой – она становится похожей на бугорчатую поверхность апельсина. Это возмущение является следствием скольжения стягивающейся резины по границе раздела вода-воздух на поверхности пузыря. Через некоторое время (60 мс) поверхность пузыря становится гладкой, а бугорки начального возмущения порождают слой мелких пузырьков воздуха, окружающих основной пузырь, представленных на рисунке 1.4.

|  |
| --- |
| http://www.videoscan.ru/store_img/magazine/16/pyz4_pic4.gif |
| Рисунок 1.4 - Формирование слоя мелких пузырьков, окружающих основной пузырь  в начальной стадии течения (представлены фрагменты кадров рисунка 1.3.) |

Таким образом, при помощи скоростной видеосъёмки (500 кадров в секунду) были получены данные, детально иллюстрирующие процесс формирования вихревого кольца при подъёме в воде воздушного пузыря объёмом 0.15 литра. В эксперименте наблюдались некоторые необычные эффекты, связанные с гидродинамическими неустойчивостями.

2 МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

В главе представлены математические модели для описания движения пузырька воздуха в вязкой жидкости, которые могут использоваться как для получения аналитического решения, так и при проведении вычислительных экспериментов в современных программных комплексах.

2.1 АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНОГО ПУЗЫРЯ, ВСПЛЫВАЮЩЕГО В ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

На рисунке 2.1. схематично показаны силы, действующие на воздушный пузырь в вязкой жидкости.

|  |
| --- |
|  |

|  |
| --- |
|  |
| Рисунок 2.1. – Схема приложенных сил для пузыря воздуха в воде |
|  |

На движущийся в вязкой жидкости пузырь действуют сила тяжести

, *(1)*

сила Архимеда

, *(2)*

сила внутреннего трения, определяемая по формуле Стокса

. *(3)*

В случае ламинарного течения жидкости, огибающей всплывающий пузырь, 2-й закон Ньютона имеет вид:

. *(4)*

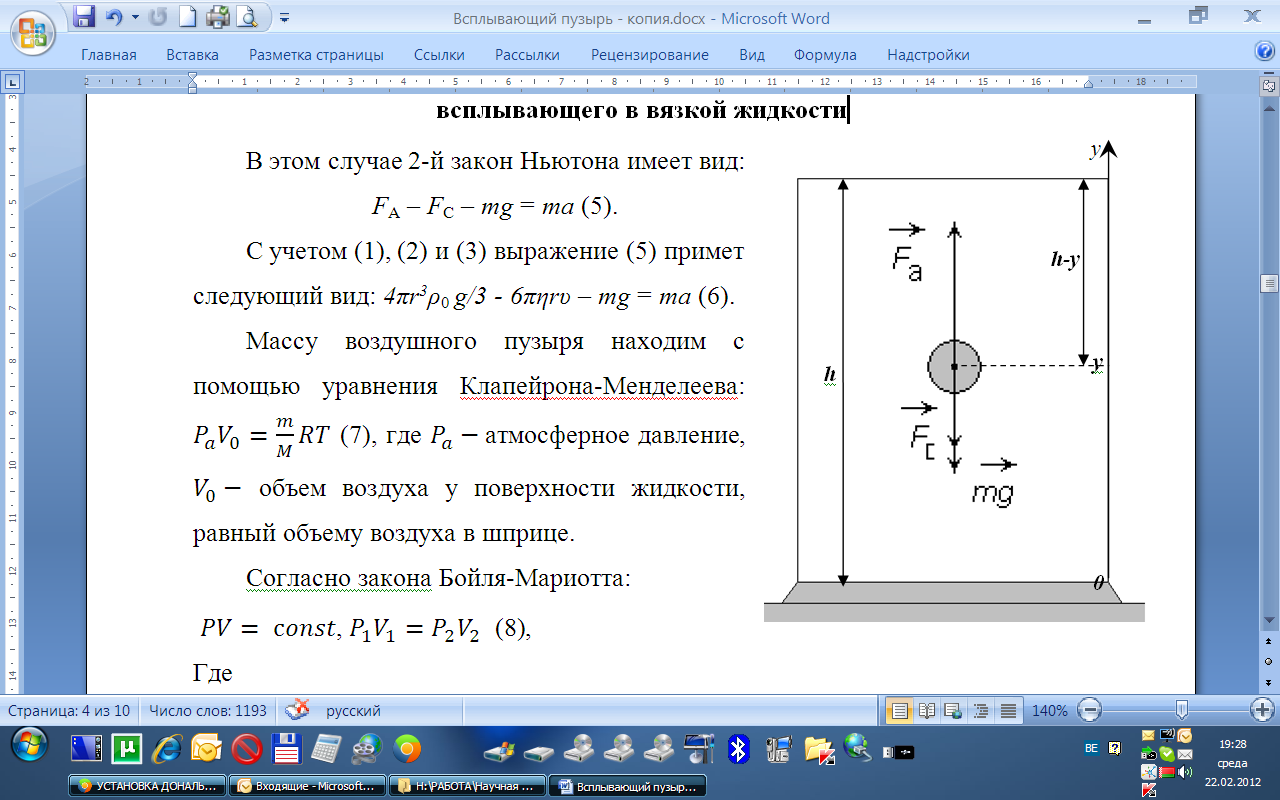
С учетом (1), (2) и (3) выражение (4) примет следующий вид:

. *(5)*

Массу воздушного пузыря находим с помощью уравнения Клапейрона-Менделеева

, *(6)*

где атмосферное давление, Па;  объем воздуха у поверхности жидкости, равный объему воздуха в шприце, м3.

**

Получим формулу зависимости радиуса воздушного пузыря от глубины. Согласно закону Бойля-Мариотта

, *(7)*

где - давление в пузырьке на глубине *y* , *(8)*

- давление в пузырьке у поверхности воды,  *(9)*

- гидростатическое давление на глубине *y*,

- лапласово давление, обусловленное поверхностным натяжением стенок пузырька.

Радиус пузырька у поверхности жидкости связан с его объёмом соотношением

.  *(10)*

C учетом этого уравнение (7) примет вид:

*(11)*

Так как давление Лапласа в данном случае существенно меньше атмосферного и гидростатического давления, то им можно пренебречь. Тогда уравнение (11) примет вид:

Таким образом, зависимость радиуса воздушного пузыря от глубины может быть выражена формулой:

*(12)*

С учетом этого выражение (5) примет следующий вид: *(13)*

или

,

так как масса мала, можно пренебречь силой тяжести .

Тогда

Обозначим,

Тогда *(14)*

или



Полученное уравнение напоминает уравнение затухающих колебаний



Действительно, коэффициент затухания должен быть прямо пропорционален вязкости жидкости и обратно пропорционален массе пузыря .

Мы предположили, что скорость пузырька с течением времени будет стремиться к некоторому постоянному значению. В этом случае , тогда уравнения *(5)* и *(14)* примут вид:

*,*

Откуда

*(15)*

2.2 ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМОЙ В ANSYS FLUENT

В настоящее время для решения газодинамических и тепловых задач, как правило, используются вычислительные программные средства, в которых реализованы, конечно-элементные, или конечно-объемные схемы для системы уравнений законов изменения массы, количества движения и энергии. Для идеального газа система уравнений, дополненная термическим уравнением состояния, имеет вид:

,

**где полная энергия выражается следующим уравнением**

,

**а полная энтальпия так**

,

**тензор вязких напряжений описывается формулой**

,

**в которую входит тензор скоростей деформаций**

,

**его также иногда обозначают как:**

3 ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

3.1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ В ANSYS

В курсовом проекте моделируется падение двух капель диаметрами 40 см и 20 см. Капли падают на стенку толщиной 5 см. В стене существуют два отверстия диаметром 20 см каждое, а так же штырь высотой 65 см и толщиной 10 см. Внизу находится слой жидкости 20 см. Геометрия расчётной области и ее фрагмент представлены на рисунке 3.1. – 3.2.

|  |
| --- |
| drop1.jpg |
| Рисунок 3.1 – Геометрия расчетной области |
| |  | | --- | | drop12.jpg | | Рисунок 3.2 – Фрагмент расчетной области | |

Далее строится неструктурированная треугольная сетка, которая содержит 49 тысяч ячеек. Её ортогональное минимальное качество 0,1. Задача решается в двумерной нестационарной постановке.

После построения сетки, в программе Fluent задаются входные параметры. Температура воздуха 300 К, давление 1 атм, плотность 1,165 кг/м3. Плотность воды 1000 кг/м3. В качестве рабочего тела используется несжимаемая жидкость и идеальный газ.

3.2 АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты падения капель на стенку в разные моменты времени представлены на рисунке 3.2.1 … 3.2.6

|  |
| --- |
| drop1.5.jpg |
| Рисунок 3.2.1- Падение капель в момент времени 1.5 с |

|  |
| --- |
| drop2.5.jpg |
| Рисунок 3.2.2 – Падение капель в момент времени 2.5 с |

|  |
| --- |
| drop3.4.jpg |
| Рисунок 3.2.3- Падение капель в момент времени 3.4 с |

|  |
| --- |
| drop4.4.jpg |
| Рисунок 3.2.4 - Падение капель в момент времени 4.4 с |

|  |
| --- |
| drop9.jpg |
| Рисунок 3.2.5 – Падение капель в момент времени 9 с |

|  |
| --- |
| drop18.jpg |
| Рисунок 3.2.6- Падение капель в момент времени 18 с |

При падении капель на них действует сила тяжести и сила поверхностного натяжения. При взаимодействии падающих капель со стенкой происходит их дробление. Из-за подключения адгезии мы наблюдаем прилепание слоя жидкости к стенке.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено исследование динамики движения пузыря. Изучено поведение пространственного пузыря при его эволюции под действием силы Архимеда, силы тяжести, поверхностного натяжения.

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

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю.Б. Базаров, Д.Е. Мешков, Е.Е. Мешков, В.С. Сиволгин Исследование подъема пузыря воздуха в канале воды квадратного сечения (в печати)
2. И.В. Григорьева. Численное моделирование динамики пространственных парогазовых пузырей / Кемеровский государственный университет, 2003. – 158 c.
3. Д.Е. Мешков, Е.Е. Мешков, В.С. Сиволгин. Исследование влияния объема всплывающего пузыря на характер течения / Вестник Саровского ФизТеха, №8, 2005. – 73 c.
4. Жидов И.Г., Мешков Е.Е., Попов В.В., Рогачёв В.Г., Толшмяков А.И. Образование вихревого кольца при всплывании большого пузыря в воде/ ПМТФ, №3, 1977. – 78 c.
5. Храбрый А.И. Численное моделирование нестационарных течений жидкости со свободной поверхностью / Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – СПб,2014, – 154 с.