

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи

**Заранкевич Илья Андреевич**



**ЧИСЛЕННОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
ПРОЦЕССОВ В ДВУХФАЗНОМ ЖИДКОСТНО-ГАЗОВОМ ЭЖЕКТОРЕ  
ПРИМЕНИТЕЛЬНО К ИСПЫТАНИЯМ РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Специальность 05.07.05

Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор  
**Козлов Александр Александрович**

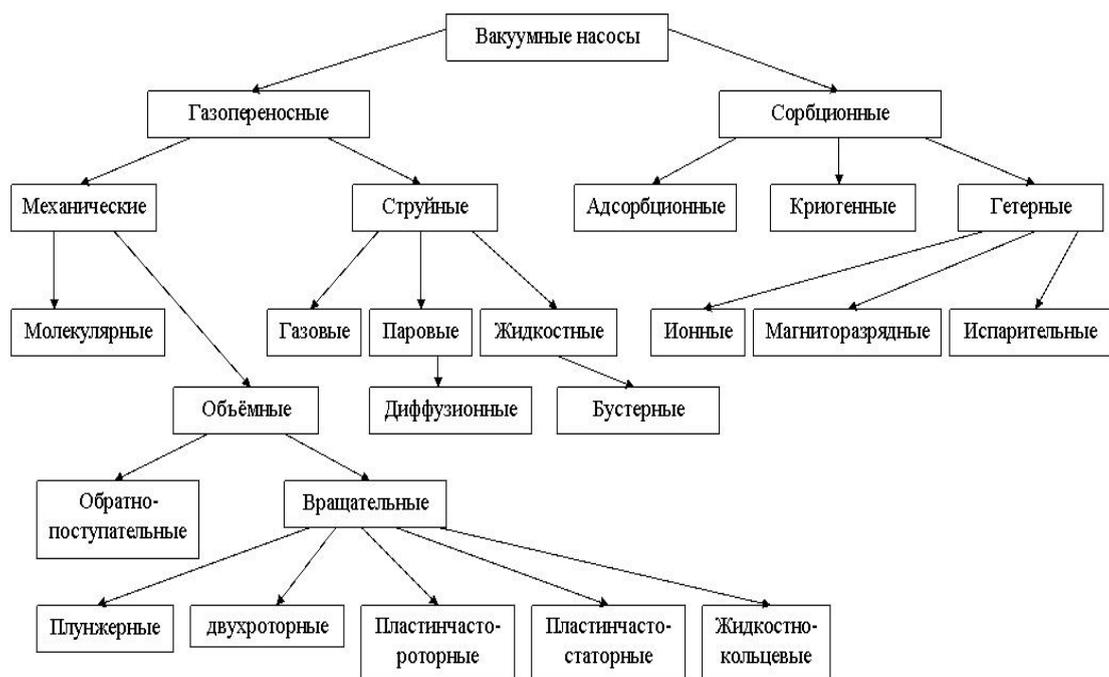
Москва – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ .....	2
ВВЕДЕНИЕ .....	4
1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ДВУХФАЗНЫХ ЭЖЕКТОРОВ.....	11
1.1. Общие сведения о двухфазных жидкостно-газовых эжекторах.....	11
1.1.1 Применение СА при испытаниях авиационных и ракетных двигателей	13
1.2. Оценка эффективности эжектора.....	15
1.2.1. Оценка эффективности двухфазного жидкостно-газового эжектора в качестве вакуумного насоса.....	16
1.2.2. Оценка эффективности двухфазного жидкостно-газового эжектора в качестве устройства формирования двухфазной высокоскоростной струи.....	19
1.3. Особенности расчета двухфазных жидкостно-газовых эжекторов.....	24
2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЖЕКТОРА С ДВУХФАЗНЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	29
2.1. Постановка задачи .....	29
2.2. Объект исследования.....	30
2.3. Система уравнений и модели расчета .....	33
2.4. Граничные условия.....	38
2.5. Расчетная сетка .....	41
2.6. Результаты численного моделирования процессов в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе.....	45
2.6.1 Результаты численного моделирования двухфазного жидкостно-газового эжектора с учетом различной конструкции смесительного элемента .....	45
2.6.2 Результаты численного моделирования струи двухфазного жидкостно- газового эжектора .....	47
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ДВУХФАЗНОМ ЖИДКОСТНО-ГАЗОВОМ ЭЖЕКТОРЕ .....	48
3.1. Стенд для испытания двухфазных смесительных устройств .....	48
3.1.1. Система подачи рабочего тела .....	48

3.1.2. Автоматизированная система управления.....	52
3.1.3. Система измерения, регистрации и обработки параметров струи .....	53
3.2. Испытания смесительного элемента эжектора.....	56
3.2.1. Испытания пластиковых образцов для определения оптимальной формы форсунки двухфазного жидкостно-газового эжектора .....	56
3.2.2. Испытания металлической форсунки двухфазного жидкостно-газового эжектора на различных режимах работы .....	59
3.2.4 Определение размеров скорости и распределения дисперсной фазы методом микроскопической высокоскоростной съемки .....	65
3.3.1. Испытания жидкостно-газового эжектора на максимальное разрежение газа на входе. ....	71
3.3.2. Испытание жидкостно-газового эжектора в качестве генератора высокоскоростной двухфазной струи.....	74
3.3.3 Исследование структуры струи двухфазного жидкостно-газового эжектора .....	74
3.4.1. Сравнение результатов численного и экспериментального моделирования рабочих процессов в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе.....	76
3.5. Рекомендации по проектированию жидкостно-газовых двухфазных эжекторов.....	78
3.6. Практическое применение полученных результатов .....	79
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	82
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ .....	84
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	86

## ВВЕДЕНИЕ

В условиях непрерывного роста цен на энергоносители оптимизация и повышение эффективности испытаний ракетных и авиационных двигателей является неотъемлемой задачей для развития авиакосмической отрасли. В процессе создания и эксплуатации ракетных и авиационных двигателей, и их агрегатов большое значение имеет подтверждение агрегатом расчетных параметров при различных внешних условиях и режимах работы. Для моделирования работы агрегатов в реальных условиях проводится множество испытаний и проверок. Один из важнейших видов испытаний – высотные (испытания агрегата при различных давлениях окружающей среды от вакуума до атмосферного). Подобные испытания имитируют поведение агрегатов и устройств при пониженном давлении и позволяют получить данные не доступные при обычных (атмосферных) условиях работы двигателя. Как известно, режим работы сопла ЖРД сильно зависит от давления на его срезе, при несоответствии давления расчетному режиму двигатель работает на перерасширенном или на недорасширенном режиме. Подобные режимы работы напрямую влияют на тягу и удельный импульс создаваемые двигателем. Отдельно из РД стоит выделить ЭРД, так как условия их эксплуатации не подразумевают работы в атмосфере и их испытания проводятся только в вакууме. Для авиационных двигателей также проводятся высотные испытания. Помимо этого, разрежение применяется при проверке кавитационного запаса насосных агрегатов и баковых систем. Общая схема высотных испытаний заключается в следующем: объект помещается в замкнутый объем – вакуумную камеру, в которой создается пониженное давление и производятся тестовые запуски. При не существенном влиянии газопритока продуктов сгорания на давление в вакуумной камере, во время работы двигателя вакуумные насосы не работают. Если же объем истекающего из сопла газа во время испытаний ведет к существенному повышению давления, то вакуумные насосы работают постоянно.



*Рисунок 1. Виды вакуумных насосов*

В большинстве вакуумных насосов, представленных на Рисунок 1, присутствуют трущиеся и вращающиеся части, что существенно снижает их ресурс. Часть насосов использует в качестве смазывающего вещества масло, которое в виде мелкодисперсных частиц выбрасывается в атмосферу вместе с откачанным воздухом. Помимо этого, при испытаниях двигателей приходится работать с горячим газом и механические вакуумные насосы не используются при подобных испытаниях. В настоящее время для обеспечения разрежения при высотных испытаниях применяются струйные аппараты - эжекторы, в некоторых случаях генератором рабочего тела эжектора может выступать и сам двигатель, но в основном используется жидкость. Использование жидкости позволяет не только увлечь за собой газ из вакуумной камеры, но и при необходимости охладить его. Кроме того, происходит снижение вредных выбросов, СА работает в качестве нейтрализатора. Принцип действия жидкостных нейтрализаторов заключается в пропускании отработанных газов через слой жидкости, чаще всего - воду. Обезвреживаются растворенные вредные вещества: альдегиды, оксиды серы, высшие оксиды азота, задерживается сажа, жидкие аэрозоли (компоненты несгоревшего топлива). Более полное поглощение примесей может быть достигнуто только использованием растворов  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{NaCO}_3$ ,  $\text{MnO}_4$ ,

этаноламинов или твердых сорбентов.

В общем виде эжектор — это струйный аппарат, ресурс которого определяется временем эрозии отверстия под воздействием воды или газа и охлажденных продуктов сгорания реактивных двигателей.

Данная работа посвящена созданию инженерной методики проектирования жидкостно-газовых эжекторов с двухфазным рабочим телом и камерой смешения с использованием пакетов прикладных программ гидрогазодинамики. Рассмотрено применение жидкостно-газовых струйных аппаратов ЖГСА для создания разрежения при проведении высотных испытаний реактивных двигателей, проведен анализ ранее проделанных работ в данной сфере. Основными характеристиками вакуумных эжекторов и насосов являются: абсолютное давление в откачиваемом объеме, массовый или объемный расход откачиваемого газа. Помимо перечисленных, для оценки эффективности эжекторов применяется параметр - коэффициент эжекции, который представляет собой отношение массового эжектируемого газа к массовому расходу жидкости. Объект исследования в работе рассматривается не только как устройство для создания вакуума, но и как устройство для смесеобразования, в частности для создания двухфазной струи с заданными параметрами, с возможностью применения для подачи компонентов топлива в камеры сгорания реактивных двигателей, в том числе ГПВРД.

Таким образом, данное исследование направлено на повышение эффективности двухфазных струйных аппаратов и является актуальной научно-технической задачей для авиационно-космической отрасли. Это, прежде всего, связано с отсутствием современной единой инженерной методики численного моделирования процессов формирования рабочего тела в двухфазных жидкостно-газовых струйных аппаратах и за их пределами. Кроме того, в настоящее время используются методики расчета, основывающиеся на экспериментальных коэффициентах, хотя развитие инструментов компьютерного моделирования позволяет проводить численное моделирование двухфазных потоков с высокой точностью при низких материальных затратах. Совершенствование методик расчета и экспериментальная проверка результатов численного моделирования процессов в двухфазных жидкостно-газовых струйных аппаратах является актуальной научной

задачей.

**Объектом исследования является** жидкостно-газовый двухфазный эжектор с профилированной камерой смешения и регулируемыми проходными сечениями жидкости и газа (для коррекции расходов компонентов и определения влияния геометрических характеристик на удельные параметры ЖГСА).

**Целью работы является** развитие и совершенствование методики численного расчета и экспериментального исследования процессов в эжекторе с двухфазным рабочим телом, для повышения эффективности стендового оборудования, уменьшение вредных выбросов и снижение материальных затрат при проведении испытаний реактивных двигателей и их агрегатов путем совершенствования процесса разработки двухфазных жидкостно-газовых струйных эжекторов большой и малой производительности, с применением численного и экспериментального моделирования внутренних процессов.

**Основные задачи, решаемые в диссертационной работе:**

1. Анализ современного состояния и перспектив развития двухфазных жидкостно-газовых эжекторов с учетом применения в авиационной и ракетной сфере.
2. Оптимизация конструкции струйной форсунки для формирования двухфазного потока на входе в камеру смешения эжектора.
3. Определение влияния характеристик двухфазного рабочего тела на удельные параметры эжектора.
4. Выбор оптимальных условий расчета двухфазного эжектора в пакетах прикладных программ гидрогазодинамики.
5. Верификация результатов расчета по экспериментальным данным, на основе сравнения расходов, давлений компонентов и параметров струи на входе и выходе из эжектора для оценки адекватности использованных математических моделей, с учетом допущений и граничных условий, принятых при расчетах.
6. Разработка рекомендаций по проектированию двухфазных жидкостно-

газовых эжекторов с использованием пакетов прикладных программ вычислительной гидрогазодинамики и экспериментально полученных данных.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Проведен сравнительный анализ применения ЖГСА для высотных испытаний РД в сравнении с уже существующими ЖГСА и ГГСА.
2. Проведен анализ влияния взаиморасположения элементов эжектора на его производительность.
3. Проведен анализ влияния дисперсности рабочей жидкости смесительного элемента эжектора на удельные параметры ЖГСА.
4. Разработана методика численного моделирования рабочего процесса жидкостно-газового двухфазного эжектора в пакетах прикладных программ гидрогазодинамики с учетом параметров струи.
5. Проведена оценка погрешности экспериментальных данных и сравнение их с результатами численного моделирования процессов в двухфазном – жидкостно-газовом эжекторе.
6. Даны рекомендации по моделированию двухфазных ЖГСА для повышения эффективности проведения высотных испытаний РД и общепромышленного применения.

**Практическая значимость работы.** Полученные экспериментальные данные позволяют снизить габариты и энергетические затраты струйных аппаратов при проведении испытаний ЖРД и РД без снижения их производительности. Выявлена возможность использования пакетов прикладных программ ANSYS и модуля CFX для расчета двухфазных жидкостно-газовых струйных аппаратов без потери точности определения характеристик двухфазного эжектора. Использование пакетов программ прикладной гидрогазодинамики позволяет дополнить, а в некоторых случаях заменить затратный эксперимент, с целью получения информации о протекающих в двухфазном эжекторе процессах.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использовались

методы численного моделирования процессов газовой динамики, реализованные на базе коммерческого пакета ANSYS CFX. Экспериментальное изучение объекта исследования проводилось на стенде для моделирования двухфазных потоков с применением аттестованных средств измерений и регистрации параметров.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты численного моделирования процессов в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе.
2. Результаты экспериментального исследования двухфазного жидкостно-газового эжектора.
3. Методика расчета жидкостно-газового двухфазного эжектора на основе численного моделирования.

**Достоверность** полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается:

- использованием известных научных положений и методов исследований;
- применением сертифицированных программных средств, для численных расчетов задач механики сплошной среды;
- согласованием результатов численного эксперимента с экспериментальными данными.

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы обсуждались на:

- ✓ 13-й Международной конференции «Авиация и космонавтика-2014» (МАИ (НИУ), г. Москва, 2014);
- ✓ Молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике 2015» (МАИ (НИУ), г. Москва, 2015);
- ✓ XI-й Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях «NPRJ» (МАИ (НИУ)г. Алушта, 2016);
- ✓ 42-й Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения» (МАИ (НИУ), г. Москва, 2016);
- ✓ Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы

- развития двигателестроения» (Самарский университет (НИУ), г. Самара, 2016);
- ✓ Международной молодёжной конференции «Гагаринские чтения» (МАИ (НИУ), г. Москва, 2017);
  - ✓ XX-й Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях «NPRJ» (МАИ (НИУ) г. Алушта, 2017);

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, из них 3 в журналах и изданиях, имеющих аккредитацию ВАК.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемых источников из 183 наименований, изложена на 101 страницах машинописного текста, включающего 60 иллюстраций и 2 таблицы.

#### **Краткое содержание работы:**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследования, отражены научная новизна, практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор литературных источников, посвященных исследованиям двухфазных жидкостно-газовых эжекторов с учетом применения в авиационной и ракетной технике и общей промышленности.

**Вторая глава** посвящена объекту исследования, граничным условиям и описанию используемых математических моделей, примененных при численном моделировании процессов, происходящих в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе. Приводится реализация численного моделирования в ANSYS CFX, а также результаты расчетно-теоретического исследования.

**В третьей главе** описан экспериментальный стенд, дается описание последовательности проведения экспериментов, а также представлены основные результаты испытаний разработанного двухфазного эжектора. Приводятся рекомендации и предложения по проектированию и организации работы струйного аппарата.

**Заключение** содержит основные результаты и выводы диссертационной работы.

# **1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАБОТ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ДВУХФАЗНЫХ ЭЖЕКТОРОВ**

Двухфазными струйными аппаратами (СА) называются устройства, в проточной части которых происходит смешение струй, находящихся в разных фазовых состояниях, с образованием смеси, полное давление которой превышает полное давление одной или обеих смешиваемых фаз. В первом случае двухфазный СА называют эжектором, а во втором - инжектором. В инжекторе происходит процесс преобразования тепловой энергии парового потока в энергию давления смеси. Двухфазные СА широко применяются во многих областях промышленности: в авиационно-космической, в тепловой и атомной энергетике, нефтехимии, при нефтегазодобыче и нефтепереработке, в глубоководной технике и т.д.

Широкое использование двухфазных СА в промышленности объясняется, главным образом, простотой их конструкции, отсутствием подвижных металлических элементов, подверженных трению, высокой надежностью и высоким ресурсом работы, малыми габаритами и массой, легкостью обслуживания, а также экономичностью применения по сравнению с некоторыми агрегатами, способными заменить эти аппараты в ряде установок.

## **1.1. Общие сведения о двухфазных жидкостно-газовых эжекторах**

Общей теории жидкостно-газового эжектора в настоящее время не разработано. Наиболее исследованным является вакуумный эжектор с двухфазным жидкостно-газовым рабочим телом. Этот эжектор применяется в различных отраслях техники уже продолжительное время. Его исследованию посвящено большое количество работ, однако, в связи со сложностью процесса смесеобразования и неопределенностью свойств получаемой двухфазной смеси создать хотя бы качественную теорию такого эжектора до сих пор не представлялось возможным. Существующие методы расчета

вакуумного ЖГСА [14,27,30-37, 41-48,50-56,76,95,108,115,165,168] являются эмпирическими и могут быть использованы лишь в сравнительно узкой области изменения параметров, характеризующих его работу. Эти методы недостаточно надежны и, в ряде случаев, существенно расходятся с результатами экспериментов.

Неудача попыток создания теории вакуумного жидкостно-газового эжектора на основе применения уравнений сохранения массы, энергии и количества движения объясняется рядом авторов тем, что масса эжектируемого газа в таком эжекторе в тысячи раз меньше массы эжектирующей жидкости и не может заметно повлиять на ее скорость. Это соображение постулируется настолько убедительно и регулярно, что без каких-либо изменений переписывается из работы в работу [27,64,115]. В связи с этим, в последние годы теория жидкостно-газового эжектора практически не развивалась и все усилия были направлены на изучение физики явления [64,108] и создание все более совершенных эмпирических методов расчета. Теоретическому исследованию газо-жидкостного эжектора с двухфазной газо-жидкостной смесью посвящена небольшая статья [150], в которой дан вывод уравнений эжекции в предположении об отсутствии теплообмена между жидкостью и газом, и рассмотрен режим запираания камеры смешения. Попытка разработать методику расчета газо-жидкостного эжектора с двухфазной газо-жидкостной смесью сделана также в работе [115]. Расчетные уравнения для газо-жидкостного эжектора, связывающие параметры потоков во входном и выходном сечениях камеры смешения, получены авторами путем формального преобразования уравнений газового эжектора при условии, что эжектируемая среда является несжимаемой. Такой упрощенный подход не позволяет, в полной мере учесть специфику течения двухфазной смеси, образующейся на выходе из камеры смешения, в связи с чем полученные уравнения могут быть использованы лишь в некоторых частных случаях задания параметров смешиваемых сред. В общем случае применение уравнений работы [115] может привести к ошибочным результатам. Особенно это относится к расчету предельных режимов работы эжектора, являющихся в большинстве случаев самыми производительными.

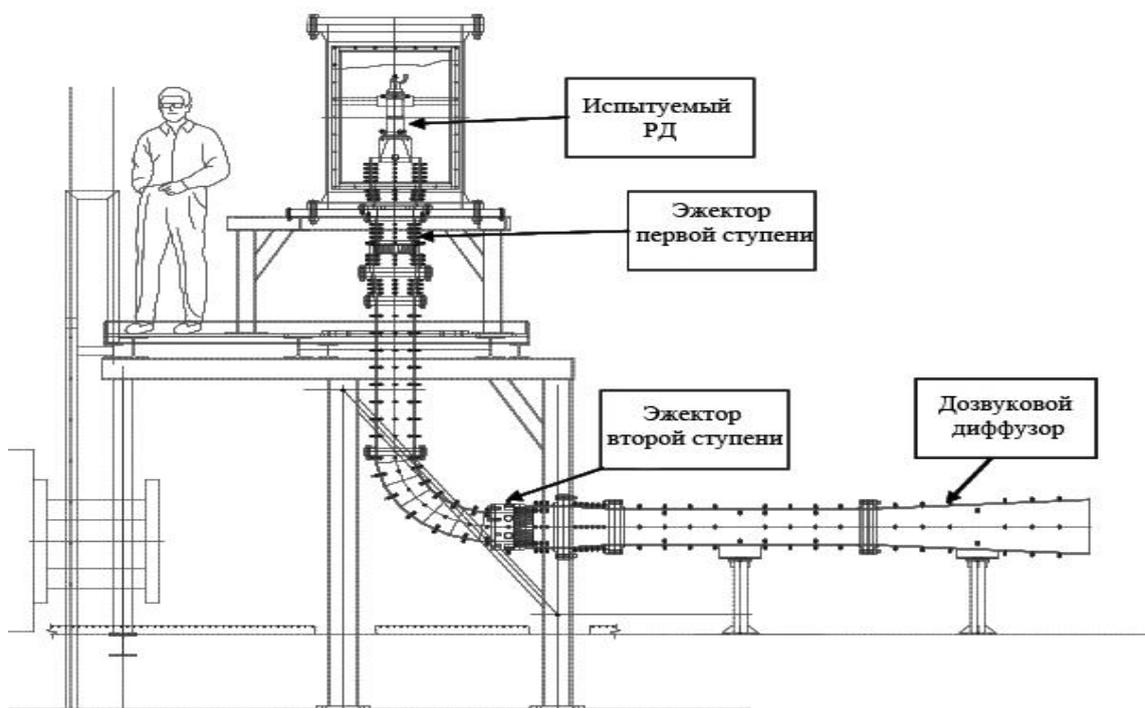
### 1.1.1 Применение СА при испытаниях авиационных и ракетных двигателей

Для проведения огневых испытаний реактивных двигателей в высотных условиях часто используют стенды, в которых разрежение и откачку продуктов сгорания топлива осуществляют газо-газовые и парогазовые СА (эжекторы) [9,151,178,179,180,181,182]. При этом для создания глубокого разрежения, ввиду того, что степень повышения давления эжектируемого газа в указанных аппаратах небольшая, приходится использовать несколько ступеней СА. В случае использования газ-газовых СА (Рисунок 3) это требует больших расходов газа. Последние ступени имеют очень большие диаметры и длины, что существенно увеличивают площадь стендового комплекса (Рисунок 2), а для парогазовых СА на выходе из ступеней устанавливают теплообменный аппарат для конденсации пара и охлаждения эжектируемого газа.



*Рисунок 2. Фотография последней ступени газ-газового эжектора на стенде фирмы Honeywell.*

На данной схеме не учтен масштаб емкостей для сжатого газа и энергозатраты на заполнение этих емкостей и подогрев жидкости до парообразного состояния.



*Рисунок 3. Схема стенда ЖРД МТ с газ-газовым эжектором.*

Применение для указанных целей ЖГСА тормозилось недостаточной их изученностью, несмотря на то, что одна ступень такого аппарата может повышать давление газа от давления насыщенных паров рабочей жидкости до давления, измеряемого единицами и десятками мегапаскалей. При использовании двухфазного СА существенно упрощается и уменьшается стендовый комплекс и его обслуживание, снижаются капитальные вложения и сокращаются сроки строительства. Кроме того, интенсивное перемешивание газа с рабочей жидкостью в камере смешения создает условия для нейтрализации продуктов сгорания и снижает шумы от работы двигателя.

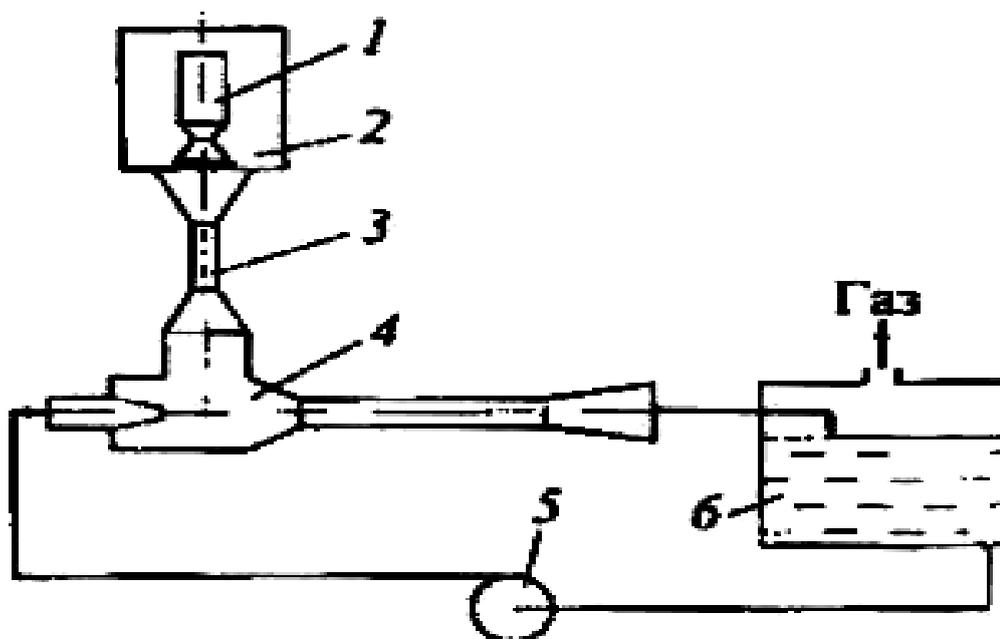


Рисунок 4. Схема стенда ЖРД МТ с ЖГСА.

Где: 1) Испытуемый двигатель, 2) Вакуумная камера, 3) Газодинамический диффузор, 4) ЖГСА, 5) Насос, 6) Сепаратор-отстойник.

На рисунке 4 приведена принципиальная схема стенда для огневых испытаний реактивных двигателей в высотных условиях с двухфазным ЖГСА на выхлопе продуктов сгорания. Кроме насосной в этой схеме может быть использована и вытеснительная система подачи жидкости в СА. Двухфазный СА за счет энергии воды сжимает продукты сгорания с давлением за газодинамическим диффузором до давления в сепараторе.

## 1.2. Оценка эффективности эжектора

Для сравнения описанных различными источниками результатов расчетов и испытаний необходимо ввести параметр эффективности. Методика оценки эффективности двухфазного ЖГСА приведена далее.

### 1.2.1. Оценка эффективности двухфазного жидкостно-газового эжектора в качестве вакуумного насоса.

Для сравнения эффективности струйных аппаратов в роли вакуумных насосов в работе [40] за коэффициент полезного действия принимается отношение полезной работы к затраченной:

$$\eta = \frac{L_{\text{полезн}}}{L_{\text{затр}}} \quad (1)$$

В зависимости от того, что принимать за полезную и затраченную работу жидкостно-газового эжектора, КПД характеризуется различными выражениями, предложенными автором работы [40]:

Для адиабатического КПД жидкостно-газового эжектора, полезной работой является работа адиабатического сжатия газа, от начального полного давления до полного давления смеси:

$$L_{\text{полезн}} = G_{\Gamma} J C_{p\Gamma} T_{\Gamma 0H} \left[ \left( \frac{P_{c0}}{P_{\Gamma 0H}} \right)^{\frac{x_{\Gamma}-1}{x_{\Gamma}}} - 1 \right] \quad (2)$$

Затраченная же работа представлена в виде работы расширения жидкости от начального полного давления  $P_{ж0H}$  до полного давления смеси  $P_{c0}$ :

$$L_{\text{затр}} = G_{\text{ж}} \frac{P_{\text{ж}0H} - P_{c0}}{\rho_{\text{ж}}} \quad (3)$$

Подставив эти выражения в формулу (1) получим:

$$\eta_{\text{ад}}^{\text{ж}\Gamma} = \frac{\rho_{\text{ж}} G_{\Gamma} J C_{p\Gamma} T_{\Gamma 0H} \left[ \left( \frac{P_{c0}}{P_{\Gamma 0H}} \right)^{\frac{x_{\Gamma}-1}{x_{\Gamma}}} - 1 \right]}{G_{\text{ж}} (P_{\text{ж}0H} - P_{c0})}$$

(4)

В ряде случаев более наглядные результаты дает оценка эффективности жидкостно-газового эжектора с помощью изотермического КПД, представляемого в виде отношения полезной работы изотермического сжатия газа от давления  $P_{ж0н}$  до давления  $P_{с0}$  формула (5) к затраченной работе расширения жидкости от давления  $P_{ж0н}$  до давления  $P_{с0}$ , формула (3).

$$L_{\text{полезн}} = G_{\Gamma} R_{\Gamma} T_{c0} \ln \frac{P_{c0}}{P_{\Gamma 0н}} \quad (5)$$

Подставив оба этих выражения в формулу найдем:

$$\eta_{\text{из}}^{\text{ж } \Gamma} = \frac{\rho_{\text{ж}} G_{\Gamma} R_{\Gamma} T_{c0} \ln \frac{P_{c0}}{P_{\Gamma 0н}}}{G_{\text{ж}} (P_{\text{ж}0н} - P_{c0})} \quad (6)$$

В данной работе КПД жидкостно-газового эжектора в качестве вакуумного насоса предлагается оценивать, как отношение изотермической работы сжатия газа от атмосферного давления до абсолютного давления в откачиваемом объеме формула (5) к гидравлической мощности, затраченной на создание требуемого режима работы форсунки двухфазного эжектора, формула (7). Работа газа принимается изотермической в виду много большей теплоемкости и значительной массовой концентрации жидкости [105,103].

$$N_{\text{гидравлическая}} = H \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot G_{\text{ж}} \cdot g \quad (7)$$

где  $H$  – напор жидкости в метрах.

Подставив оба выражения (5), (7) в формулу (1) получим:

$$\eta_{из}^{жг} = \frac{G_{г} R_{г} T_{с0} \ln \frac{P_{с0}}{P_{г0н}}}{H \cdot \rho_{ж} \cdot G_{ж} \cdot g} \quad (8)$$

Зависимость (8) в полной мере характеризует энергетические параметры двухфазных жидкостно-газовых эжекторов и позволяет производить сравнительную оценку их эффективности. На рисунке 5 и рисунке 6 приведены сравнительные характеристики промышленного эжектора ЭВ-7-1000 описанного в работе [115], и спроектированных эжекторов [105] по методике, изложенной в данной диссертации.

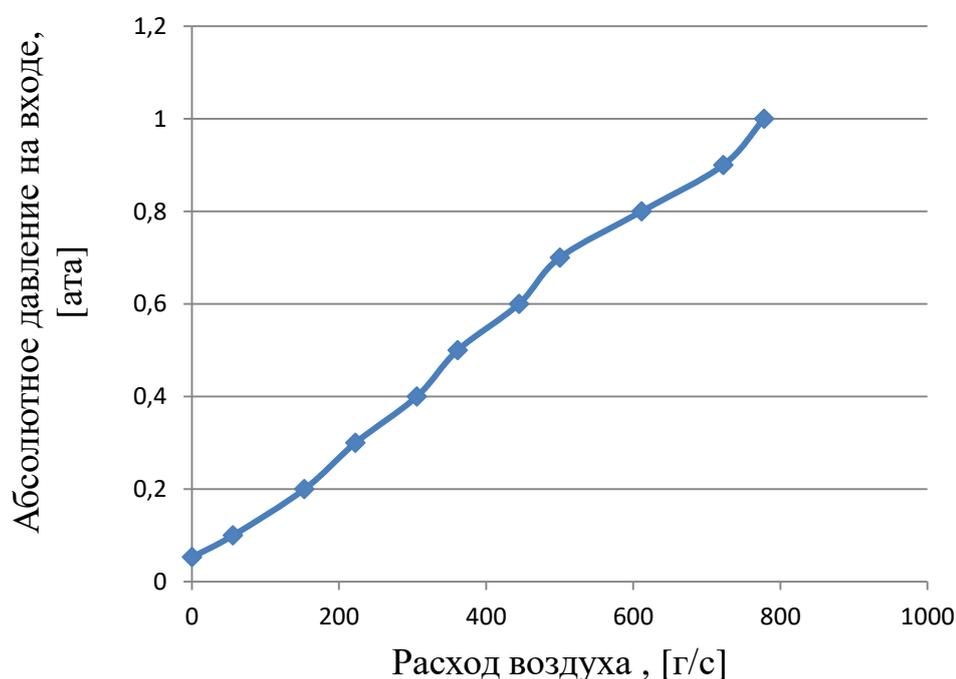
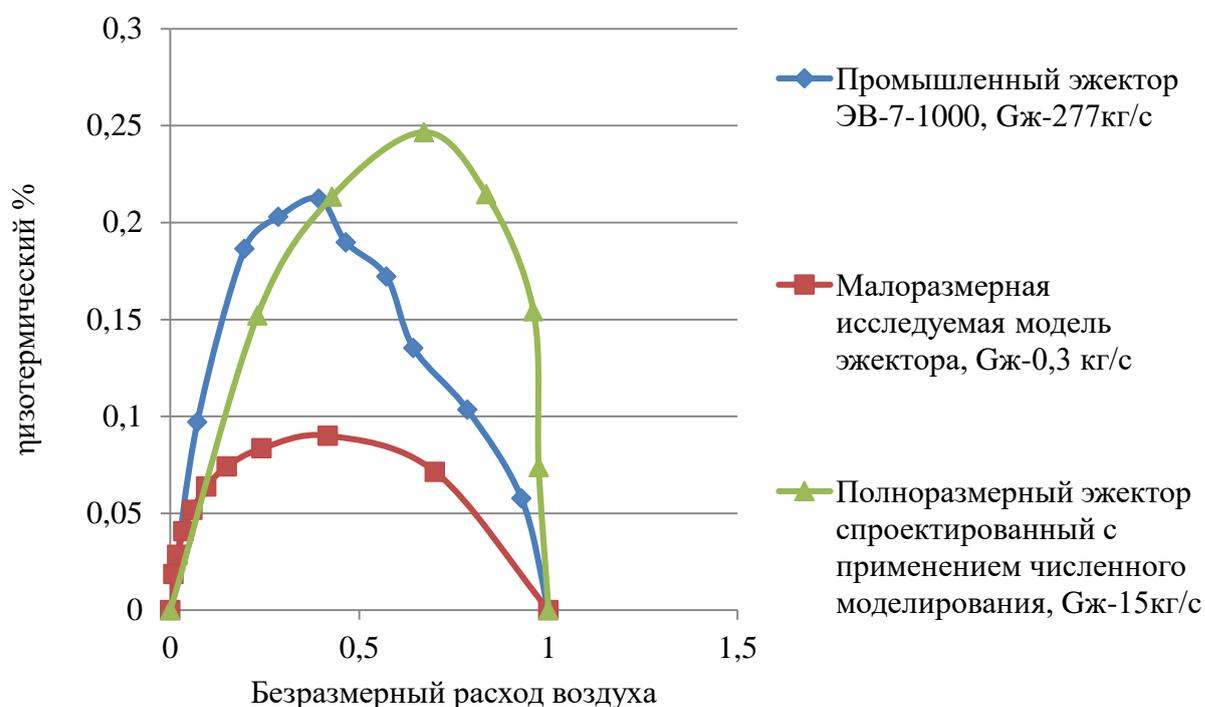


Рисунок 5. Зависимость расхода эжектируемого воздуха эжектора ЭВ-7-1000 от абсолютного давления в откачиваемом объеме.



*Рисунок 6. Зависимость КПД различных эжекторов от безразмерного расхода эжектируемого воздуха.*

В проанализированных работах не всегда указаны подробные характеристики режимов работы эжекторов, что значительно затрудняет анализ их энергоэффективности, в частности не всегда доступна зависимость эжектируемого массового расхода воздуха от создаваемого разрежения в откачиваемом объеме. Данный факт связан с трудностью измерения массового расхода воздуха и отсутствием средств измерения у авторов. В большинстве работ даны объемные коэффициенты эжекции, полученные путем пересчета и имеющие большую погрешность расчетов.

### **1.2.2. Оценка эффективности двухфазного жидкостно-газового эжектора в качестве устройства формирования двухфазной высокоскоростной струи**

Сравнение энергетических характеристик двухфазных струйных аппаратов при использовании их в качестве устройства, формирующего двухфазную высокоскоростную струю, производится следующим образом:

По результатам численного моделирования либо экспериментам определяются

локальные поля массовых расходов фаз (газа и жидкости).

- для жидкости экспериментально локальные значения скоростей в сечении струи  $W_{жi}$  определяются методом PIV. Зондовым методом определяются локальные значения расходов жидкости  $G_{жi}$ , затем в каждой измеренной точке поля определяется величина  $G_{жfi}$ , по формуле (9):

$$\frac{G_{жi}}{f_i} = G_{жfi} \quad (9)$$

Где  $f$  – площадь входного отверстия зонда

Сечение струи разбивается на равномерные по площади кольца  $\Delta F_i$  и по формуле (10) производится интегрирование по сечению, до получения значения заданного в эксперименте расхода  $G_{ж}$ . По этому значению определяется радиус струи и площадь сечения  $F$ .

$$G_{ж_{ср}} = \int_0^F G_{жfi} dF = \sum_i^n G_{жfi} \Delta F_i \quad (10)$$

По формуле (11) находятся средние значения скорости жидкости  $W_{ж_{ср}}$ .

$$W_{ж_{ср}} = \frac{G_{ж}}{\rho_{ж} F} \quad (11)$$

-для газа: по измерению расходомером после зондового отборника в каждой точке поля определяется величина локального значения расхода  $G_{гi}$ , статического давления и температуры. Затем в каждой измеренной точке поля определяется величина  $G_{гfi}$  по формуле (12):

$$\frac{G_{гi}}{f_i} = G_{гfi} \quad (12)$$

Где  $f$  – площадь входного отверстия зонда

Площадь струи  $F$  разбивается на равномерные по площади кольца  $\Delta F_i$  и по формуле (13) определяется суммарный расход газа по сечению  $G_{\Gamma}$  :

$$G_{\Gamma_{\text{ср}}} = \int_0^F G_{\Gamma} f_i dF = \sum_i^n G_{\Gamma} f_i \Delta F_i \quad (13)$$

Затем определяется плотность газа  $\rho_{\Gamma}$  и средняя скорость газа  $W_{\Gamma_{\text{ср}}}$ , формулы (14),(15)

$$\rho_{\Gamma} = \frac{P_{\text{H}}}{RT} \quad (14)$$

$$W_{\Gamma_{\text{ср}}} = \frac{P_{\text{H}}}{RT} \quad (15)$$

Выражением (16) определяется коэффициент эжекции  $K$ .

$$K = \frac{G_{\Gamma}}{G_{\text{Ж}}} \quad (16)$$

Далее рассчитывается  $\eta_{\text{эж}}$  – КПД эжектора, как устройства для создания высокоскоростной двухфазной струи. По формуле (17) определяем теоретическую скорость жидкости  $W_{\text{Ж}}$  при заданном перепаде давления на входе в эжектор по отношению к атмосферному давлению

$$W_{\text{Ж}} = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (17)$$

$$\Delta P = P^* - P_H \quad (18)$$

Где:  $P_H$  – атмосферное давление.

$$P^* = P_{изм} + \frac{\rho W_{ж в трубе}^2}{2} + P_H \quad (19)$$

$$W_{ж в трубе} = \frac{G_{ж}}{\rho \cdot F_{трубы}} \quad (20)$$

где  $F_{трубы}$  - проходное сечение трубы.

Из этого следует, что формула (19) приводится к следующему виду:

$$\Delta P = P_{изм} + \frac{\rho W_{ж в трубе}^2}{2} \quad (21)$$

Введем следующие дополнительные обозначения:

$$\varepsilon = \frac{W_{г ср}}{W_{ж ср}} \quad (22)$$

$$\varphi_1 = \frac{W_{ж ср}}{W_{ж}} \quad (23)$$

Выражение КПД эжектора для оценки эффективности формирования струи имеет вид:

$$\eta_{эж} = \frac{W_{ж ср}^2 G_{ж} + W_{г ср}^2 G_{г}}{W_{ж}^2 G_{ж}} \quad (24)$$

или с учетом (16),(22),(23):

$$\eta_{\text{эж}} = \varphi^2 + K\varepsilon^2 \cong \varphi^2 \quad (25)$$

КПД эжектора, как устройство создания высокоскоростной двухфазной струи следует определять, с учетом КПД каждого из устройств, участвующих в смесеобразовании, а именно необходимо учитывать потери на форсунке и потери на сопле двухфазного эжектора, тогда необходимо определить скорость струи жидкости после смесителя  $W_{\text{ср см}}$ , аналогично по измерениям PIV, либо из численного моделирования форсунки эжектора. Обозначим:

$$\varphi_1 = \frac{W\phi}{W_T} \quad (26)$$

Тогда КПД форсунки будет:

$$\eta_{\text{см}} = \varphi_1^2 \quad (27)$$

Аналогично введем КПД камеры смешения эжектора  $\eta_{\text{ксм}}$

$$\eta_{\text{ксм}} = \frac{W_{\text{жср}}^2 G_{\text{ж}} + W_{\text{гср}}^2 G_{\text{г}}}{W_{\text{ж}}^2 G_{\text{ж}}} \quad (28)$$

$$\varphi_2 = \frac{W_{\text{жср}}}{W_{\text{ср см}}} \quad (29)$$

$$\eta_{\text{ксм}} = \varphi_2^2 \quad (30)$$

Окончательно получаем:

$$\eta_{\text{эж}} = \eta_{\text{КСМ}} \cdot \eta_{\text{СМ}} = \varphi_1^2 (\varphi_2^1 + K \varepsilon^2) \cong \varphi_1^2 \cdot \varphi_2^2 \quad (31)$$

### 1.3. Особенности расчета двухфазных жидкостно-газовых эжекторов

Существующие расчетные методики ЖГСА можно разделить на четыре основные группы: методики в основе которых уравнение баланса энергии [10,14,72,74,85,108,164,168], эмпирические зависимости [20,27,67,66,65,75-89,96-108,115], уравнение сохранения количества движения [57,90,89,92,95,154], а также на теоретические зависимости, полученные в результате совместного решения уравнений неразрывности, количества движения, энергии и состояния при различных допущениях [28,38,39,40,70,91,93,94,128,129,130,131,132,133,134,135,139,140,141,142,143,144]. Рассмотрим их более подробно. Предложенная С. Пфлайдерером [168] методика расчета ЖГСА основана на уравнении баланса энергии. При этом он предполагает, что кинетическая энергия воды, вытекающей из сопла расходуется на изотермическое сжатие воздуха. В работах [108,87,10,165,168] авторы в отличие от С. Пфлайдерера учитывают некоторые дополнительные факторы, оказывающие влияние на характеристики ЖГСА. К. Клоне [165], проведя экспериментальное исследование жидкостно-газового СА и определив существование двух различных режимов его работы, доработал методику С. Пфлайдерера. Им предложено использовать уравнение баланса энергии только для расчета режимов работы ЖГСА, на которых давление газа на входе зависит от противодавления смеси на выходе из аппарата, а для остальных режимов предлагает эмпирическую зависимость. Г.А. Аронс [14] расширил область использования эмпирической зависимости К. Клоне. Авторы последующих работ [21,64,65,66,67,68,69], выявив значительное расхождение экспериментальных данных, представленных авторами вышеуказанных работ, с результатами расчётов по приведенным методикам, предложили чисто эмпирические зависимости, которые распространяются только на диапазон параметров, изученный ими, выбранный из области использования ЖГСА. В ранних работах [20,76,115,25] влияние длины камеры смешения на характеристики ЖГСА не учитывалось. В более поздних исследованиях

[64,65,66,67,68,69] уже приводятся эмпирические зависимости для выбора оптимальных размеров камеры смешения в экспериментально исследованном диапазоне геометрических и режимных параметров ЖГСА. Ряд авторов при расчете ЖГСА, как и при расчете струйных насосов, используют уравнение сохранения количества движения для камеры смешения совместно с уравнением неразрывности [154,95,92,91,57]. Наиболее обоснованно такая методика расчета изложена в работе Р. Ж. Канингэма [90]. В ней уравнения количества движения и неразрывности применяют только для режимов работы ЖГСА, при которых зона смешения потоков заканчивается в камере смешения, а уравнение энергии используется при анализе предельно возможного диапазона работы аппарата на рассматриваемых режимах. Р. Ж. Канингэм полагает, что в ЖГСА в выходном сечении камеры смешения могут реализоваться только дозвуковые и, режимы течения двухфазной смеси со скоростью, равной скорости звука. При этом зона смешения потоков различной фазы заканчивается в камере смешения. Кроме того, могут устанавливаться режимы течения, при которых зона смешения заканчивается в диффузоре. При этом жидкостная струя проходит камеру смешения практически на всей её длине и подвергается полному распаду только в диффузоре. По результатам экспериментальных исследований ЖГСА опубликовано большое количество работ [3,4,5,7,8,11,12,13,15,16,17,18,19,20,21,25,26,27,28,29,40,57,58,59,61,62,68,69,76,90,94,113,115,116,117,134,137,143,144,147,152,163,166,171-176 и др.]. В них описано множество различных режимов работы ЖГСА, изложено объяснение структуры потока в проточной части аппарата, отражается влияние геометрических (диаметра и длины камеры смешения, формы сопла и др.) и режимных (давления, температуры, расхода) характеристик на его параметры. Рассмотренные выше методики расчета не обосновывают многообразие режимов работы ЖГСА, не позволяют определить границы перехода с одного режима работы на другой, не описывают зависимость характеристик ЖГСА от формы, длины камеры смешения и ряда других параметров. Эти методики применимы, как правило, только для узко выбранного режима работы ЖГСА. Поэтому авторы следующих работ [40,38,63,70,128,129,130,131,132,133,150] предлагают методику расчета ЖГСА (одновременно и ГЖСА), основанную на нетеоретических зависимостях, полученных в результате совместного решения

уравнений неразрывности, количества движения, энергии и состояния с привлечением тех или иных условий для определения параметров работы двухфазного СА. В работе [150] В.П. Шидловский, предполагая отсутствие теплообмена между газом и жидкостью в камере смешения и образование в ее выходном сечении однородной равновесной смеси, приводит вывод уравнений эжекции, которые позволяют для фиксированных параметров потока газа и жидкости на входе в СА определить по два значения скорости, давления и температуры смеси в выходном сечении камеры смешения. В работе отмечается, что может реализоваться только режим течения смеси, соответствующий меньшей скорости; показывается, что обращение в ноль подкоренного выражения в решении квадратного уравнения, определяющего скорость течения смеси в выходном сечении камеры смешения, соответствует достижению ею скорости распространения в смеси бесконечно малых возмущений, что приводит к запиранию камеры смешения ЖГСА. Ю.Н. Васильев в работе [40], в отличие от В.П. Шидловского, приводит вывод уравнений эжекции в предположении образования в выходном сечении камеры смешения однородной термодинамической и механически равновесной двухфазной смеси. Эти уравнения дают два значения скорости смеси в выходном сечении камеры смешения. Сопоставляя полученные скорости со скоростью распространения звука в смеси, автор показывает, что меньшая из них соответствует дозвуковому, а большая - сверхзвуковому режиму течения двухфазной смеси в выходном сечении камеры смешения. Реализация сверхзвукового течения приводит к запиранию камеры смешения, в результате чего возмущения не передаются против течения потока. Автором рассмотрены два возможных режима запирания камеры смешения: критический [1], при котором течение смеси на выходе из камеры смешения сверхзвуковое, и режим, при котором скорость смеси на выходе из камеры смешения равна скорости звука. На основании исследования изотермического КПД при изменении режима работы СА, в [40] приведено условие реализации критического режима работы ЖГСА с сужающимися соплами только для случая, когда температуры торможения газа и жидкости на входе в камеру смешения равны. Таким условием является равенство скоростей газа и жидкости во входном сечении камеры смешения сверхзвуковой скорости смеси в ее выходном сечении. Для экспериментального подтверждения расчетов были проведены испытания серии вакуумных ЖГСА с

различным числом стволов жидкостного сопла  $Z_c=1..327$  [40]. Различие между результатами испытаний ряда двухфазных эжекторов с одноствольным жидкостным соплом, приведенными в работах [16,27,29,39,64,67,76], и расчетами по методике Ю. Н. Васильева авторы работы [39] объясняют неравномерностью потока на выходе из камеры смешения. В работах М. Е. Дейча [54] и Я. Г. Шапиро [148] учитывается неравномерность профиля скоростей на выходе из камеры смешения газо-газового и жидкостно-жидкостного струйного аппарата путем введения коэффициента в уравнение сохранения количества движения. Дальнейшее развитие теории и методика расчета двухфазного эжектора получила в работах, проведенных в МГТУ им Н. Э. Баумана [6,9,10,63,70,128,129,131,132,133,134,139-146].

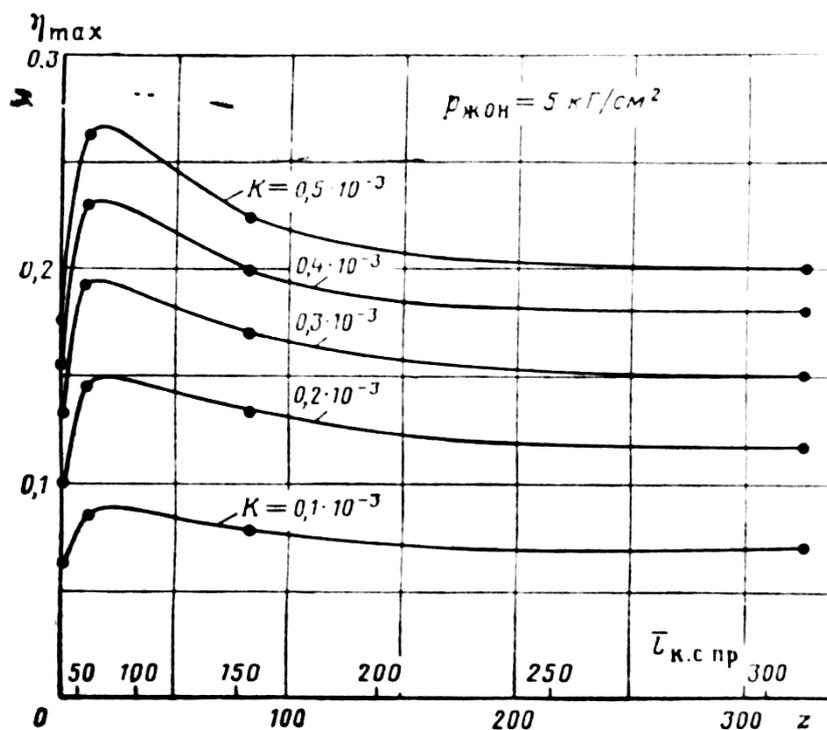


Рисунок 7. Зависимость максимального КПД от числа стволов жидкостного сопла.

Установлено (Рисунок 7), что экспериментальные дроссельные характеристики в случае  $Z > 12$  качественно совпадают с теоретическими, причем отмечается удовлетворительное совпадение теории с экспериментом при малых и существенное различие при больших значениях коэффициента эжекции [2]. Авторы работ [23,24,49,75,114,115,118] исследуют ЖГСА и ГЖСА с позиций их применения в химической промышленности в качестве тепло- и массообменного аппарата. В связи с этим в указанных работах уделяется внимание, в основном, процессам взаимодействия

в камере смешения диспергированной на капли жидкости с газом.

Не все рассмотренные выше методики расчета двухфазного эжектора учитывают изменения их характеристик с изменением геометрических и режимных параметров аппарата. Это часто приводит к существенному рассогласованию между результатами расчетов по разным методикам (Рисунок 8) и экспериментом. Так, эмпирические зависимости, по которым построены характеристики 2 – 4, получены авторами только для исследованного ими диапазона геометрических и режимных параметров двухфазного эжектора. При этом в процессе проведения экспериментов не уделялось должного внимания предыстории формирования жидкой фазы, форме жидкостного сопла и другим параметрам. Ряд параметров не учитывает и методика, предложенная Ю. Н. Васильевым.

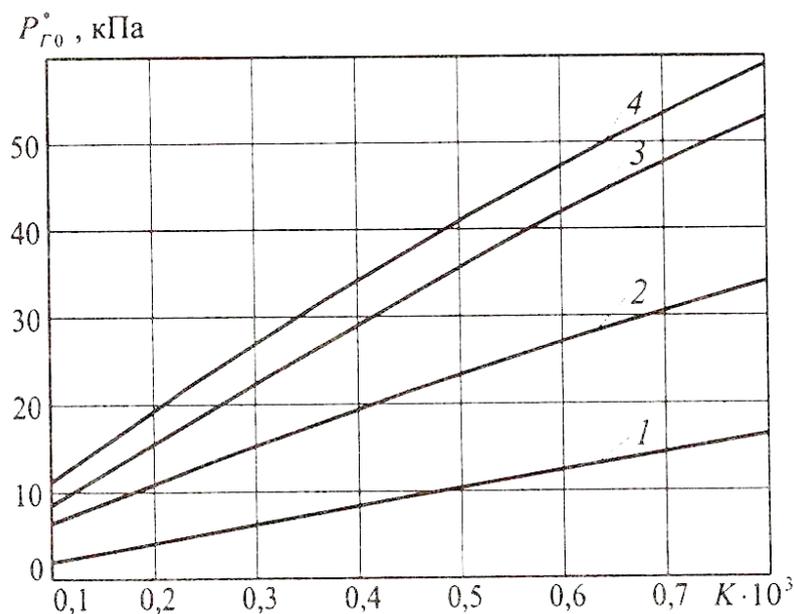


Рисунок 8. Сравнение результатов расчета характеристики ЖГСА ( $\alpha=4,9$ ;  $P_{ж0}^*=746$  кПа;  $P_{сз}^*=132$  кПа): 1 – по Ю. Н. Васильеву; 2 – по М. И. Баженову; 3 – по Н. М. Зингеру; 4 – по Л. Д. Берману, Г. И. Ефимочкину.

По результатам обзора можно сделать следующие выводы:

- Наличие перспективы применения двухфазных ЖГСА для повышения эффективности проведения высотных испытаний РД.

- Отсутствие теоретических и экспериментальных работ, связанных с исследованием влияния дисперсности рабочего тела на удельные параметры двухфазного ЖГСА при атмосферных условиях.

- Отсутствие теоретических и экспериментальных работ по использованию и проектированию ЖГСА для формирования двухфазных высокоскоростных струй.

- Отсутствие работ, посвящённых численному моделированию двухфазных ЖГСА в пакетах прикладных программ гидрогазодинамики и подтверждение результатов расчетов экспериментами.

Поэтому предлагаемые в работе исследования и методика численного моделирования процессов работы двухфазного ЖГСА являются новыми и актуальными.

## **2. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЖЕКТОРА С ДВУХФАЗНЫМ РАБОЧИМ ТЕЛОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

### **2.1. Постановка задачи**

При выполнении численного моделирования двухфазного жидкостно-газового эжектора ставились следующие задачи:

1) Проверка возможности использования пакетов прикладных программ гидрогазодинамики для расчета процессов в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе и двухфазной струе.

2) Разработка наименее ресурсоемкой методики численного моделирования основных параметров работы двухфазного жидкостно-газового эжектора в пакетах прикладных программ гидрогазодинамики.

3) Описание процессов работы двухфазного жидкостно-газового эжектора.

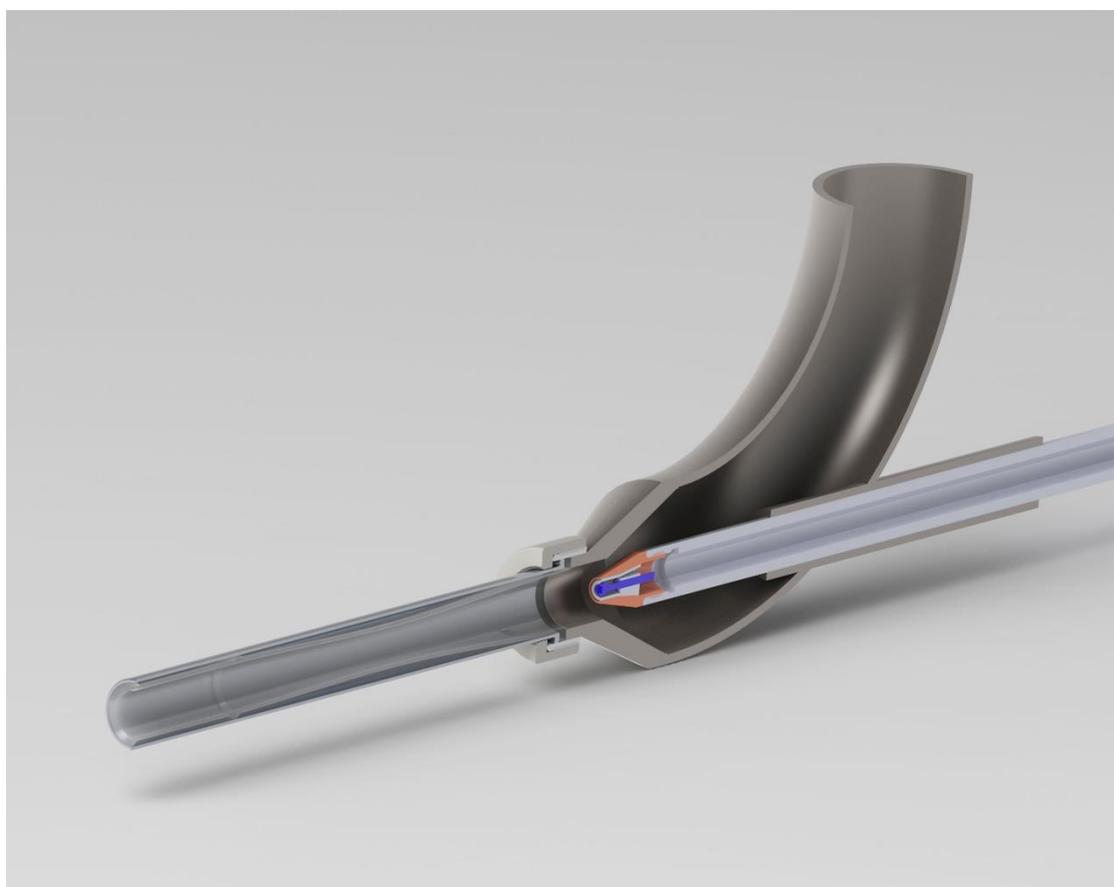
При подготовке к численному моделированию был проведен анализ работ по численному моделированию ЖГСА, выявлено наличие работ по численному

моделированию масляного ЖГСА и ЖГСА на сжиженном CO<sub>2</sub> [167,169,176], парогазового эжектора [170]. Работы по моделированию двухфазных ЖГСА при атмосферных условиях и в качестве рабочего тела которых выступает вода - отсутствуют.

## 2.2. Объект исследования

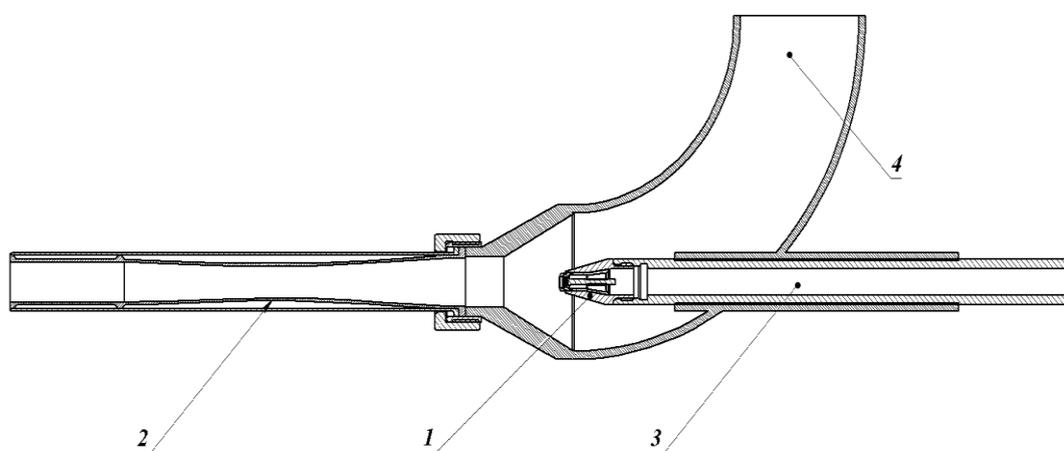
Поставленные в работе задачи численного моделирования процессов в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе потребовали разработки объекта исследования. Описание конструкции и функциональных возможностей данного устройства приведены далее.

В роли объекта исследования выступает жидкостно-газовый двухфазный эжектор, рабочим телом которого является вода. Воспринимающей фазой является - атмосферный воздух (Рисунок 9).



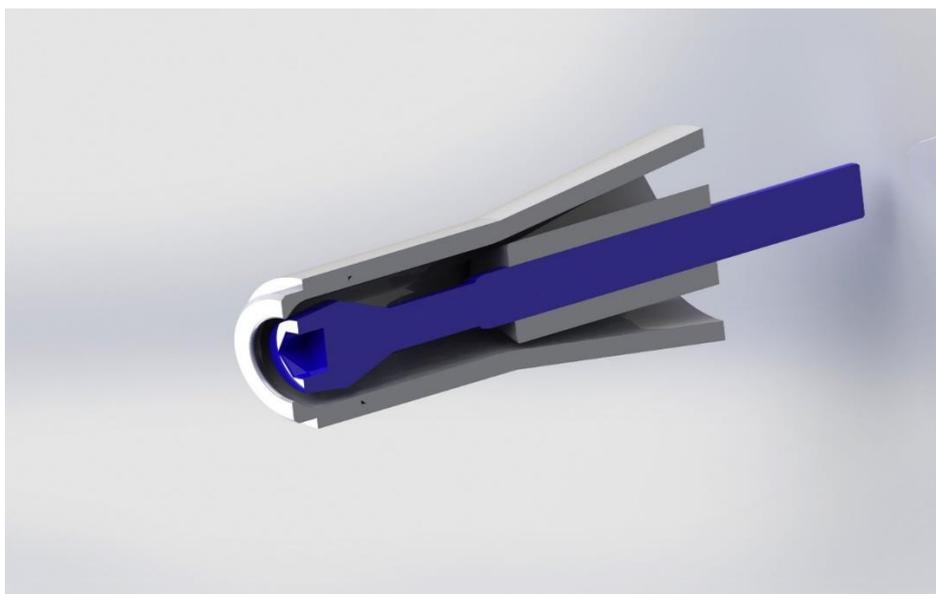
*Рисунок 9. 3D модель экспериментального жидкостно-газового двухфазного эжектора.*

Рассмотрим более детально исследуемый эжектор (Рисунок 10). Он состоит из струйной форсунки 1 с регулируемым проходным сечением, профилированной сверхзвуковой камеры смешения 2, трубки подачи воды выполняющей роль регулятора положения форсунки в эжекторе 3 и патрубка подачи воздуха 4. Подвод жидкости в камеру смешения осуществляется струйной форсункой 1 с регулируемым проходным сечением. Проходное сечение регулируется для изменения расхода истекающей из форсунки жидкости. Регулировка производится перемещением центрального тела форсунки, в дальнейшем сокращённо называемого ЦТФ. Для регулировки количества воздуха, подаваемого в эжектор, форсунка 1 объединена с трубкой подачи жидкости 3 и образует центральное тело эжектора (в дальнейшем ЦТЭ). При перемещении ЦТЭ относительно оси эжектора происходит изменение проходного сечения на входе в сопло эжектора. Воздух, в свою очередь, подается в эжектор через патрубок 4, связанный напрямую с атмосферой.



*Рисунок 10. Конструкция эжектора в сборе.*

Подача жидкости в камеру смешения двухфазного жидкостно-газового эжектора осуществляется через струйную форсунку с регулируемым проходным сечением (Рисунок 11). Она состоит из регулировочного винта, так называемого центрального тела форсунки (ЦТФ). Центральное тело ввернуто в пилонообразное перекрестие. Вворачивая или выворачивая ЦТФ можно изменять расход жидкости [105,103].



*Рисунок 11. 3D модель регулируемой форсунки*

Сопло эжектора произведено методом стерео литографии по 3D модели, что позволило изготовить его за одну операцию при условии сохранения сложного профиля сопла (Рисунок 12).



*Рисунок 12. 3D модель сопла двухфазного жидкостно-газового эжектора*

## 2.3. Система уравнений и модели расчета

В ANSYS CFX доступны две разные модели многофазных потоков [177]: многофазная модель Эйлер-Эйлера и модель отслеживания частиц Лагранжа. В этом разделе описывается теория многофазных потоков Эйлер-Эйлера, которая и была принята для расчета. Обоснованием принятия данной модели расчета является сложность структуры течения двухфазного потока. В нашем случае предварительные эксперименты показали, что на выходе из двухфазного жидкостно-газового эжектора пузыри газа заключены в пленку жидкости, то есть можно принять скорость жидкости и скорость газа одинаковой. Помимо этого, скорости жидкости и газа сравниваются в камере смешения эжектора при взаимодействии фаз друг с другом. Предполагается, что жидкие среды в многофазном потоке смешаны в макроскопическом масштабе размеров, гораздо большем, чем молекулярном. Примерами являются газовые пузырьки в жидкости, капли жидкости в газе или в другой несмешивающейся текучей среде. В этом случае необходимо решение для различных характеристик, таких как полей скоростей и температур, для каждой фазы. Они могут взаимодействовать друг с другом с помощью межфазовых сил, тепловых потоков и переноса через границу раздела фаз.

Важно различать многокомпонентный и многофазный поток. Многокомпонентной считается жидкостно-газовая среда, состоящая из смеси химических соединений на молекулярном уровне. В этом случае можно определить средние поля скорости и температуры, которые выражаются для газо-жидкостной среды. Примерами могут служить газовые смеси, и вещества, растворенные в жидкостях.

Многофазный поток представляет собой течение, в котором присутствует более чем одна жидкая (газовая) фаза. В общем случае, фазы состоят из различных видов химических веществ, таких, например, как воздух-вода. В некоторых случаях они могут представлять различные термодинамические фазы одного и того же вида, такие как пароводяной многофазный поток.

В рамках модели Эйлер-Эйлера, используется модель смешения элементарных фазовых объемов или модель свободной межфазной поверхности. Таким образом,

могут быть смоделированы условия межфазного обмена, которые используются в различных моделях переноса: импульса, тепломассообмена и других. Вычисляется межфазная локальная плотность участвующей в расчете пары жидкость-газ, используемая для однородных и неоднородных моделей переноса и рассчитываемая в соответствии с одной из этих моделей.

Рассмотрим некоторые особенности рабочего тела (двухфазного потока), используемого в эжекторе для решения выше сформулированных задач. Это равновесная модель двухфазного равновесного жидкостно-газового потока с высокой массовой концентрацией жидкости в газе в диапазоне массовых соотношений 30-100 массовых долей жидкости на 1 массовую долю газа. Камера двухфазного жидкостно-газового эжектора работает в диапазоне от давления меньше атмосферного до атмосферного давления.

Как известно, для построения модели двухфазного потока используются следующие системы уравнений: для каждой фазы - уравнения неразрывности, количества движения, энергии и состояния, а также уравнения межфазного взаимодействия и, если необходимо, то зависимости коэффициентов переноса (вязкости, теплопроводности, диффузии, теплоемкости). При учете турбулентности используется осредненная система уравнений и различные модели турбулентности. С учетом выше сделанных допущений для расчета можно воспользоваться однородной моделью, имеющей одну температуру и скорость.

Различные фазы газо-жидкостных сред в ANSYS обозначаются строчными греческими буквами-индексами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , и так далее, но для лучшего представления и понимания следует представлять теорию двухфазного потока в классических обозначениях, то есть обозначим газовую фазу индексом 1, а жидкую индексом 2. Например, объемная доля газа обозначается  $r_1$ . Таким образом, объем  $V_1$ , занимаемый газовой фазой 1, в малом объеме  $V$  вокруг точки с объемной долей  $r_1$  определяется формулой (32):

$$V_1 = r_1 V \tag{32}$$

Общее количество фаз для нашего конкретного случая определено как 2.

Важно провести различие между плотностью фазы и эффективной плотностью газо-жидкостной среды  $I$ . Плотность материала фазы,  $\rho_1$  является плотностью среды, только если представлена одна единственная фаза, то есть масса фазы  $\alpha$  на единицу объема фазы  $I$ . Эффективная плотность определяется следующим образом:

$$\rho_1^{\sim} = r_1 \rho_1 \quad (33)$$

Фактическая масса на единицу объема фазы  $I$ , учитывая, что фаза  $I$  занимает только часть объема, определяет плотность двухфазной смеси как:

$$\rho = \rho_1 r_1 + \rho_2 r_2 \quad (34)$$

Учтём, что плотность газовой фазы определяется как:

$$\rho_1 = \frac{p}{RT} \quad (35)$$

А плотность жидкости для нашего конкретного случая постоянна:

$$\rho_2 = const \quad (36)$$

Для расчета требуется вычислять среднее значение теплоемкости однородной двухфазной смеси в конечном объеме:

$$c_p = c_{p1} \chi_1 + c_{p2} \chi_2 \quad (37)$$

, где:  $\chi_1$  – массовая доля газовой фазы;

$\chi_2$  – массовая доля жидкой фазы.

$$\chi_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} \quad (38)$$

$$\chi_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2} \quad (39)$$

, где:  $G_1$  – массовый расход газовой фазы;

$G_2$  – массовый расход жидкой фазы.

Рассмотрим отношения параметров фаз: массовых расходов

$$\bar{G} = \frac{G_2}{G_1} \quad (40)$$

и отношение плотностей:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (41)$$

Оценим значения объемных концентраций фаз, используя отношение уравнений расхода фаз:

$$\frac{G_2}{G_1} = \frac{r_2 \rho_2 w_2 F}{r_1 \rho_1 w_1 F} \quad (42)$$

с учетом (33), (34), (41) объемная доля газовой фазы принимает следующий вид:

$$r_1 = \frac{1}{\frac{\bar{G}}{\bar{\rho}} + 1} \quad (43)$$

Используя значения рабочего диапазона по расходам и давлениям, следует заключить, что среднее значение объемной концентрации газовой фазы  $r_1$  будет не

ниже значения 0,9, что соответствует газочапельной структуре течения. Это обстоятельство говорит о необходимости использовать в расчете турбулентный характер течения в камере смешения эжектора. И уравнения модели должны быть записаны через осредненные параметры (как уравнения Рейнольдса) с учетом дополнительных вязких напряжений и тепловых потоков, с использованием соответствующей модели турбулентности. Учитывая высокую концентрацию жидкости следует использовать условие равновесного течения по скорости и температуре и не учитывать зависимость теплоемкости и коэффициента вязкости от температуры. Следует также отметить, что большие скорости жидкости, используемые в эжекторе, и ее большая плотность позволяют пренебречь гравитацией.

Тогда система уравнений математической модели может быть записана в следующем виде, аналогично модели сжимаемого газа с дополнением соотношений (33-39) и условием:

$$\mu = \mu_1 + \mu_2 \quad (44)$$

, Где  $\mu$  коэффициенты молекулярной вязкости.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \vec{W} = 0 \quad (45)$$

$$\frac{\partial \vec{W}}{\partial t} + (\vec{W} \cdot \vec{\nabla}) \vec{W} = \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \frac{v}{3} \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{W}) + v (\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}) \vec{W} + \vec{\nabla} S^* \quad (46)$$

, Где:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (47)$$

коэффициент кинематической вязкости,

$\vec{W}$  – вектор скорости,

$S^*$ -тензор турбулентных напряжений:

$$S^* = \begin{vmatrix} -\rho w_x'^2 & -\rho w_x' w_y' & -\rho w_x' w_z' \\ -\rho w_x' w_y' & -\rho w_y'^2 & -\rho w_x' w_z' \\ -\rho w_x' w_z' & -\rho w_x' w_y' & -\rho w_z'^2 \end{vmatrix} \quad (48)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left( c_h T + \frac{W^2}{2} \right) = \left[ \mu \Delta \vec{W} + \frac{1}{3} \mu \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{W}) \right] \vec{W} + \mu D + Q_w \quad (49)$$

, Где:  $D$  - диссипативная функция,

$Q_w$  - энергия от тепловых пульсационных потоков.

Предлагаемая модель является одной из основных многофазных моделей, реализованных в ANSYS CFX, причем имеется ряд моделей турбулентности, позволяющих подобрать наиболее соответствующую экспериментальным результатам, но целью данной работы не была оценка влияния моделей турбулентности на качество результатов расчета, поэтому выбор модели турбулентности основывался на работе [138]. Поэтому численное моделирование процессов в эжекторе было проведено в пакете прикладных программ гидрогазодинамики ANSYS в модуле CFX.

## 2.4. Граничные условия

Поскольку в реальном эжекторе скорости фаз на левой границе на входе в камеру смешения различаются по скорости, а используется равновесная модель, то в качестве скорости двухфазной среды на левой границе задавалось среднее значение, рассчитываемое на основе законов сохранения массы и количества движения, а в качестве температуры - среднее значение по массе и энергии. Масса жидкости существенно больше массы газа, поэтому реальный процесс выравнивания температур и скоростей происходит еще до входа в камеру смешения, что позволяет получать минимальные погрешности в расчете.

В качестве граничных условий на входе в расчетную область задавались следующие параметры: массовый расход рабочего тела (вода), температура воды, температура и атмосферное давление окружающего воздуха. На выходе задается

атмосферное давление.

Для численного моделирования были выбраны четыре режима работы двухфазного жидкостно-газового эжектора. Выбор проводился исходя из того чтобы давление подачи рабочей жидкости всегда было одинаково – 27 атмосфер, а изменялось проходное сечение форсунки и расход рабочего тела, параметры расчета представлены в (Табл. 1)

Таблица 1. Проходное сечение форсунки пересчитано с трехмерной модели, изменение сечения происходит за счет вворачивания или выворачивания ЦТФ по резьбе в пилоновидном теле регулируемой форсунки.

Расход Жидкости г/с	Площадь сечения форсунки мм <sup>2</sup>
170	1,8345
205	3,9758
240	5,7368
275	7,1182

*Таблица 1. Массовые расходы и проходные сечения регулируемой форсунки*

Так как в диссертационной работе не ставилась задача анализа влияния моделей турбулентности на результаты расчета двухфазных течений, модель турбулентности выбиралась, основываясь на результатах работы [138], в которой были рассмотрены различные модели турбулентности, приведены сравнения с экспериментальными данными и даны рекомендации по их применению.

Учитывая, что для успешного моделирования процессов в двухфазных жидкостно-газовых эжекторах необходимо рассчитывать, как пристеночные течения, так и течение в ядре потока, и моделировать течение двухфазного потока, в настоящей диссертационной работе выбрана модель турбулентности SST Ментера [177].

Модель SST объединяет в себе лучшие качества  $k - \varepsilon$  и  $k - \omega$  моделей. Она является гибридной моделью турбулентности, основанной на использовании

в пристеночной области  $k - \omega$  модели [177], а в ядре потока –  $k - \varepsilon$  модели [177]. Такой комбинированный подход заключается в преобразовании уравнений  $k - \varepsilon$  модели к формулировке  $k - \omega$  с помощью стыковочной функции (формула 53, 57) вблизи поверхности и  $F_1 = 0$  за пределами пограничного слоя.

В модели турбулентности SST [177] турбулентная вихревая вязкость вычисляется из турбулентной кинетической энергии и удельной скорости диссипации: Коэффициент турбулентной вязкости определяется по формуле:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \quad (50)$$

Модель SST  $k - \omega$  на основе модели BSL  $k - \omega$  [177] учитывает перенос напряжения турбулентного сдвига и дает очень точные предсказания начала и величины отрыва потока при неблагоприятных градиентах давления. Модель BSL сочетает в себе преимущества моделей Wilcox и  $k - \varepsilon$  [177], но все же не позволяет правильно предсказать начало и степень отрыва потока от гладких поверхностей. Этот недостаток подробно описан Менгером, и, в первую очередь, возникает потому, что эти модели, не учитывают перенос турбулентного напряжения сдвига, завышая вихревую вязкость. Правильное поведение переноса получено при введении ограничения при формировании параметра вихревой вязкости:

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega S F_2)} \quad (51)$$

Где:

$$v_t = \mu_t / \rho \quad (52)$$

$F_2$  это функция смешивания, которая ограничивает пограничный слой у стенки, поскольку лежащие в основе допущения не верны для свободных сдвиговых течений,

$S$  - является инвариантной мерой скорости деформации.

Стыковочные функции в модели SST определяются следующими формулами:

$$F_1 = \tanh(\text{arg}_1^4) \quad (53)$$

$$\text{arg}_1 = \min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k} \cdot 500\nu}{\beta' \omega y' y^2 \omega}\right) \frac{4\rho k}{CD_{k\omega} \sigma_{\omega 2} y^2}\right) \quad (54)$$

Где:

$y$  - расстояние до ближайшей стенки;

$\mu$  - кинематическая вязкость;

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} 1.0 \cdot 10^{-10}\right) \quad (55)$$

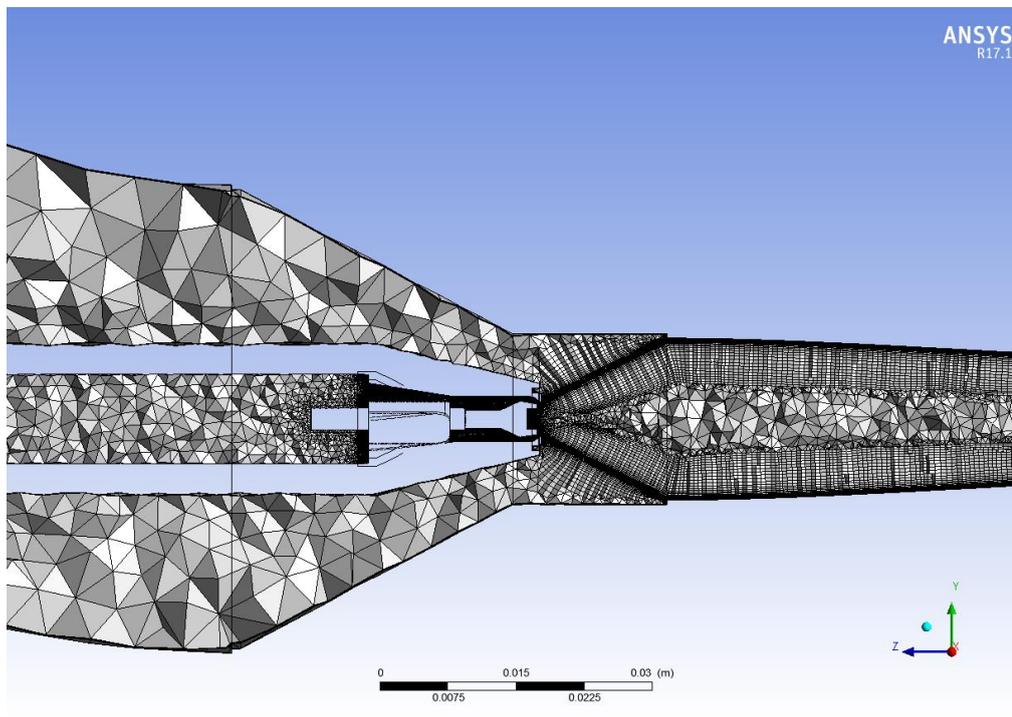
$$F_2 = \tanh(\text{arg}_2^2) \quad (56)$$

$$\text{arg}_2 = \max\left(\frac{\sqrt{k} \cdot 500\nu}{\beta' \omega y' y^2 \omega}\right) \quad (57)$$

## 2.5. Расчетная сетка

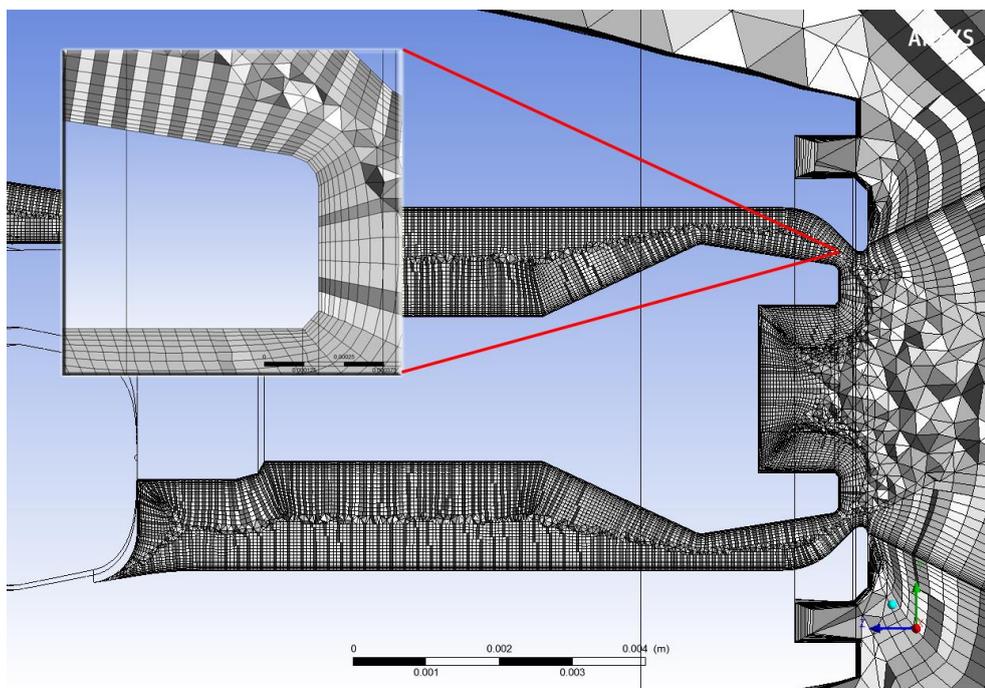
Исходя из условия снижения ресурсозатратности численного моделирования, в частности снижения времени расчета, сетка строилась в ANSYS mesher, что снизило время построения, толщина пограничного слоя составляла 15 конечных элементов.

Общий вид сетки, области сгущения и пограничного слоя приведены на рисунке 13 и рисунке 14.



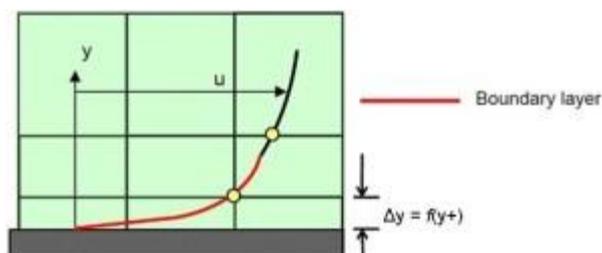
*Рисунок 13. Расчетная сетка в камере смешения ЖГСА.*

Сетка состоит из эжекторной и струйной частей и включает 17715233 элемента и 8333773 узлов.



*Рисунок 14. Расчетная сетка в районе среза форсунки.*

Значение  $Y^+$  представляет собой безразмерное расстояние (на основе локальной скорости конечного элемента текучей среды) от стенки к первому узлу сетки, можно видеть на рисунке 15. Чтобы использовать функцию стенки в подходе для конкретной модели турбулентности с уверенностью, мы должны гарантировать, что наши значения  $Y^+$  находятся в пределах определенного диапазона.

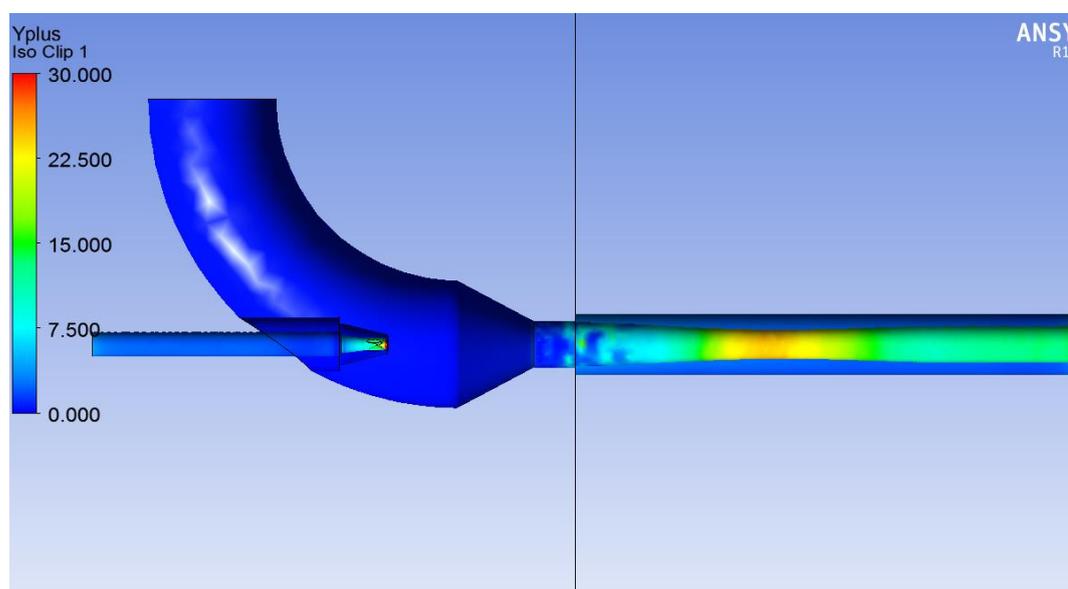


*Рисунок 15. График значений  $Y^+$  от удаления от стенки.*

Глядя на изображении выше, мы должны гарантировать, что значения  $Y^+$  не получены такими, что первый узел сетки не выходит за пределы области пограничного слоя. Если произойдет обратное, то функция стенки, используемая выбранной моделью турбулентности, может неправильно рассчитать свойства

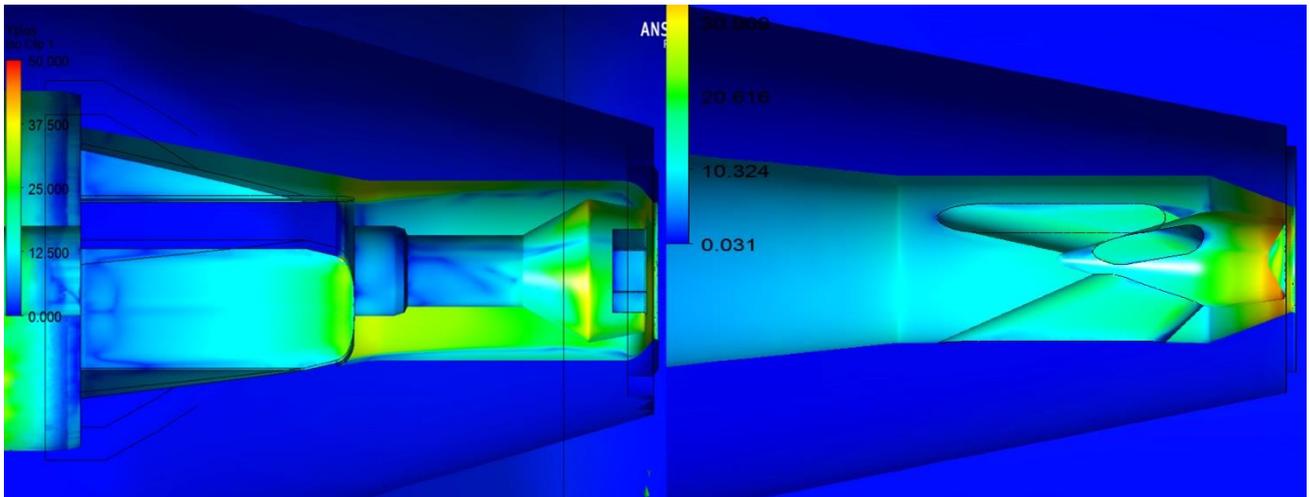
текущей в этой первой расчетной точке, что приведет к ошибкам при расчете падения скорости и давления. Верхний предел применимости будет варьироваться в зависимости от физики потока и формы профиля пограничного слоя.

Например, у потоков с очень высоким числом Рейнольдса (как правило при обтекании самолетов, кораблей и т.д.) профиль пограничного слоя будет выглядеть в виде логарифмической функции, которая достигает нескольких тысяч  $Y^+$  единиц, в то время как низкое число Рейнольдса в таких потоках, как лопатки турбины могут иметь верхний предел всего лишь 100  $Y^+$  единиц.



*Рисунок 16. Значения  $Y^+$  сетки, ЖГСА*

На практике это означает, что использование пристеночных функций для этих классов течений следует избегать, так как их использование будет ограничивать общее количество узлов сетки, которые могут быть размещены в пределах пограничного слоя. В общем, рекомендуется стремиться поместить необходимое достаточное количество ячеек сетки пропорционально увеличению толщины сетки, в пределах пограничного слоя, а не просто стремиться к достижению какого-либо конкретного значения  $Y^+$ .



*Рисунок 17. Изображение полей величин  $Y^+$  для металлической регулируемой ( $Y^+$  до 40) и для пластиковой форсунки ( $Y^+$  до 30).*

Величина  $Y^+$  для сетки объекта исследования была принята не более 100 (Рисунок 16, Рисунок 17) в наиболее важных местах, таких как форсунка, сопло, камера смешения, исходя из рекомендаций к моделированию двухфазных потоков.

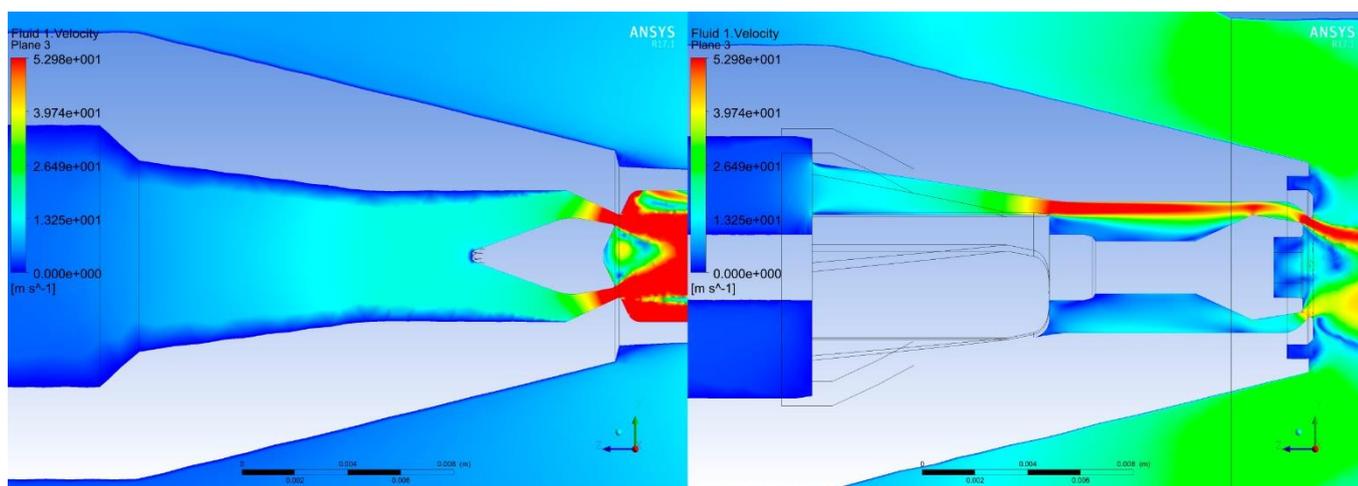
## **2.6. Результаты численного моделирования процессов в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе**

Результаты численного моделирования показали, прежде всего, возможность применения пакетов прикладных программ гидрогазодинамики к численному моделированию двухфазного жидкостно-газового эжектора.

### **2.6.1 Результаты численного моделирования двухфазного жидкостно-газового эжектора с учетом различной конструкции смесительного элемента**

При сравнении результатов численного моделирования процесса истечения жидкости из пластиковой острокромочной форсунки с пилонами и центральным телом, образующим кольцевой канал, с результатами численного моделирования процесса

истечения жидкости из металлической регулируемой форсунки (Рисунок 18) было обнаружено, что металлическая форсунка имеет существенные гидравлические потери по ее тракту. Потери были вызваны зажатием проходного сечения каналов форсунки Y-образным пилоновидным телом. В результате этот конструктивный недостаток приводил к перепаду порядка восьми атмосфер на участке от входа до выхода из смесителя и потери трети рабочего давления. Данным фактом пришлось пожертвовать в виду того, что металлическая форсунка предусматривалась регулируемой и имела сложности в изготовлении. Из-за образования данного перепада, снижалась скорость струи на выходе из эжектора, но для проверки численного моделирования это было не существенно, так как оно очень точно отражало изменения скоростей как в смесительном элементе, так и на выходе из форсунки ЖГСА.

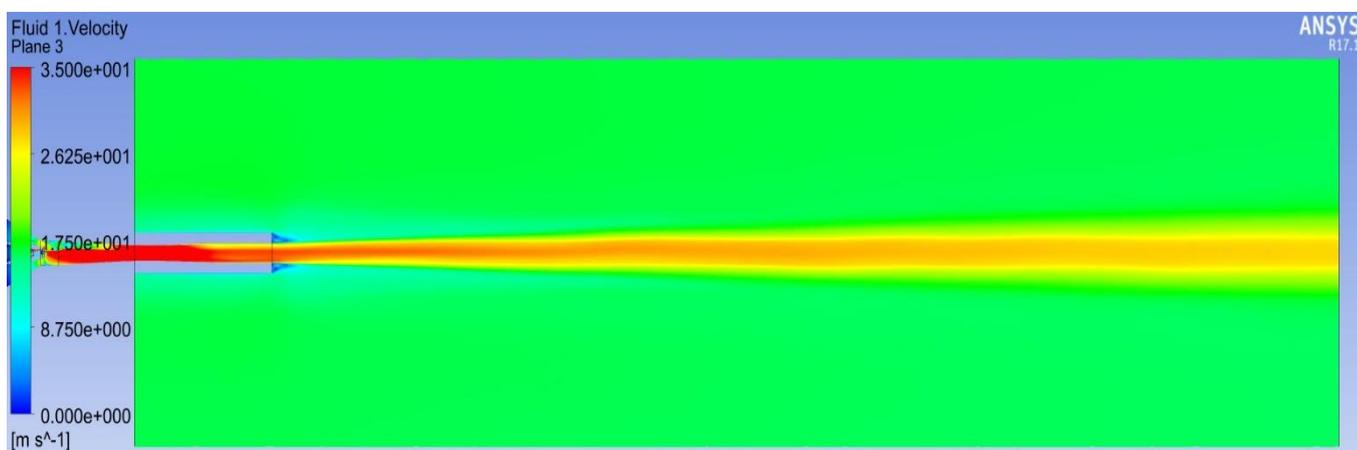


*Рисунок 18. Течение жидкости в пластиковой форсунке (слева) и в металлической регулируемой (справа).*

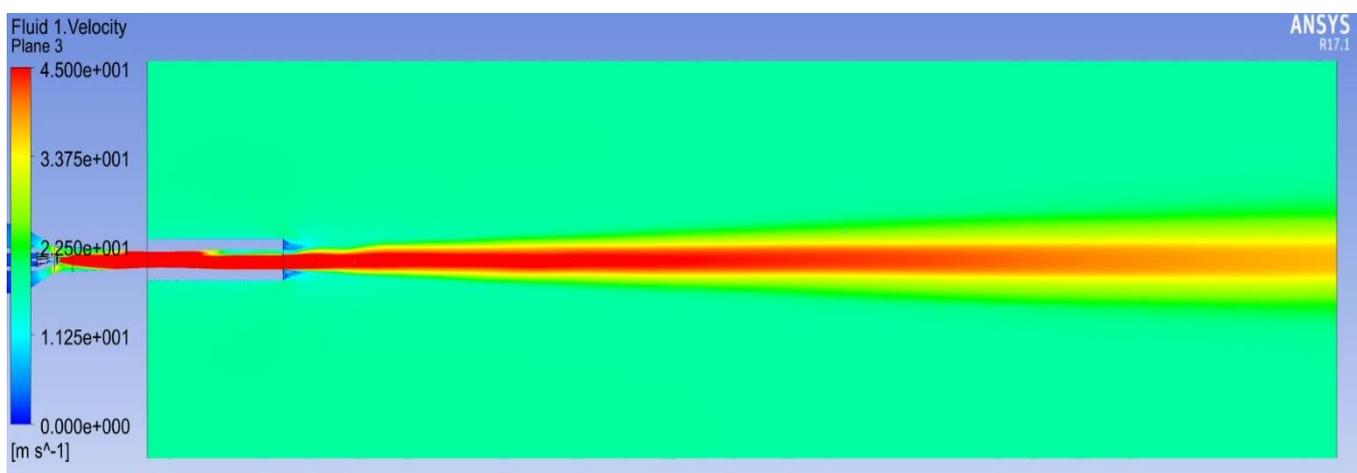
В дальнейшем при проектировании смесительного элемента эта проблема решается исключением возможности регулирования расхода жидкости и проектированием нерегулируемой форсунки, под конкретный режим работы эжектора.

## 2.6.2 Результаты численного моделирования струи двухфазного жидкостно-газового эжектора

Из результатов расчетов процесса течения двухфазной высококонцентрированной струи, генерируемой ЖГСА на четырех основных режимах расхода рабочего тела, следует, что максимальная скорость струи достигалась при режиме расхода рабочей жидкости 170 г/с (Рисунок 20), а минимальная - при режиме расхода рабочей жидкости 275 г/с (Рисунок 19).



*Рисунок 19. Поле скоростей вдоль оси струи двухфазного эжектора при расходе жидкости 275 г/с.*



*Рисунок 20. Поле скоростей вдоль оси струи двухфазного эжектора при расходе жидкости 170 г/с.*

### **3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ДВУХФАЗНОМ ЖИДКОСТНО-ГАЗОВОМ ЭЖЕКТОРЕ**

Любое численное моделирование требует подтверждения расчетов экспериментальными данными для оценки точности и адекватности выбранных методик расчета и допущений. В данной главе описывается экспериментальный стенд, методы проведения экспериментов, измеряемые параметры и сравнение результатов экспериментов с расчетами.

#### **3.1. Стенд для испытания двухфазных смесительных устройств**

В данной части работы приводится описание испытательного стенда, приборов и способов измерения параметров ЖГСА. Испытания проводились на стенде для исследования двухфазных течений с заданными параметрами каждой фазы (расход, давление). Рабочим телом ЖГСА является вода, подаваемая в эжектор, которая в свою очередь создает разрежение на входе в эжектор и увлекает воздух из атмосферы. Внутри эжектора происходит образование двухфазной газокapельной среды, которая является рабочим телом.

##### **3.1.1. Система подачи рабочего тела**

Упрощенная схема установки изображена на рисунке 22. Установка состоит из двух частей: гидравлической и пневматической. В нашем случае речь пойдет только о гидравлическом контуре, так как принудительной подачи воздуха в эжектор не производится, весь воздух для образования двухфазного рабочего тела заимствован из

окружающей среды через входной патрубок эжектора.

Гидравлический контур установки закольцован на бак с водой и может работать продолжительное время без остановки, обеспечивая статический режим работы ЖГСА. При необходимости пополнение уровня воды в баке осуществляется от водопроводной магистрали. Под продолжительным временем подразумевается время безостановочного проведения эксперимента. Данная возможность обеспечивается двумя многоступенчатыми центробежными насосами “Grundfos CR10-14” (максимальное давление подачи 14 атмосфер, расход жидкости 1500 г/с) позиция 4 и “Grundfos CRE 1-36” (максимальное давление подачи 22 атмосферы, расход жидкости 500 г/с) позиция 5 на Рисунок 22. Насосы включены последовательно для создания большего максимально возможного давления подачи жидкости в смесительном элементе ЖГСА при стабильном расходе и режиме работы смесителя эжектора. Ранее стенд не был обеспечен вторым насосом и для достижения давления подачи жидкости больше 14 атмосфер приходилось работать на вытеснительной системе подачи жидкости. Данный способ проявил себя не стабильно, при изменении газовой подушки происходил дрейф расхода жидкости и продолжительного статического режима работы смесителя добиться было сложно.

Отдельной проблемой при испытаниях эжекторов является измерение расхода. Требуется прибор, обеспечивающий точное измерение расхода эжектируемого газа до 3% от диапазона измерений и низкий перепад давления. В данном случае не подходят кориолисовы и термоанемометрические расходомеры, перепадные расходомеры также не соответствуют условиям эксперимента. Решение данной задачи было найдено в автомобилестроении, в современных автомобилях для контроля смесеобразования используются расходомеры, работающие при условиях разрежения, так как поршневой ДВС обеспечивает всасывание воздуха. Для испытаний был выбран расходомер BOSCH HFM-5 0280217123 (Рисунок 21), работающий в диапазонах расходов 2,2 – 102 г/с.



*Рисунок 21. Массовый расходомер воздуха BOSCH HFM-5 0280217123*

Абсолютное давление на входе в эжектор измеряется образцовым вакуумметром, при проверке расхода при различных абсолютных давлениях вход в эжектор прикрывается шибером и снимается расходная характеристика и изменение параметров струи. Для ликвидации вероятности внесения возмущений от шибера в воздушный поток перед расходомером и за ним, участок десять калибров до и после него выполнены прямыми без изменения проходного сечения.

Двухфазная высокоскоростная струя после выхода из ЖГСА и измерения ее параметров тормозится и разделяется на воздух и воду в сепараторе, представляющем из себя пористую структуру (позиция 13), вода стекает обратно в ванну, замыкая цикл, а сепарированный влажный воздух выбрасывается в атмосферу вентилятором ВЦ 5-45 (позиция 14). Время эксперимента в этом случае ограничивается лишь наличием питания в электросети.

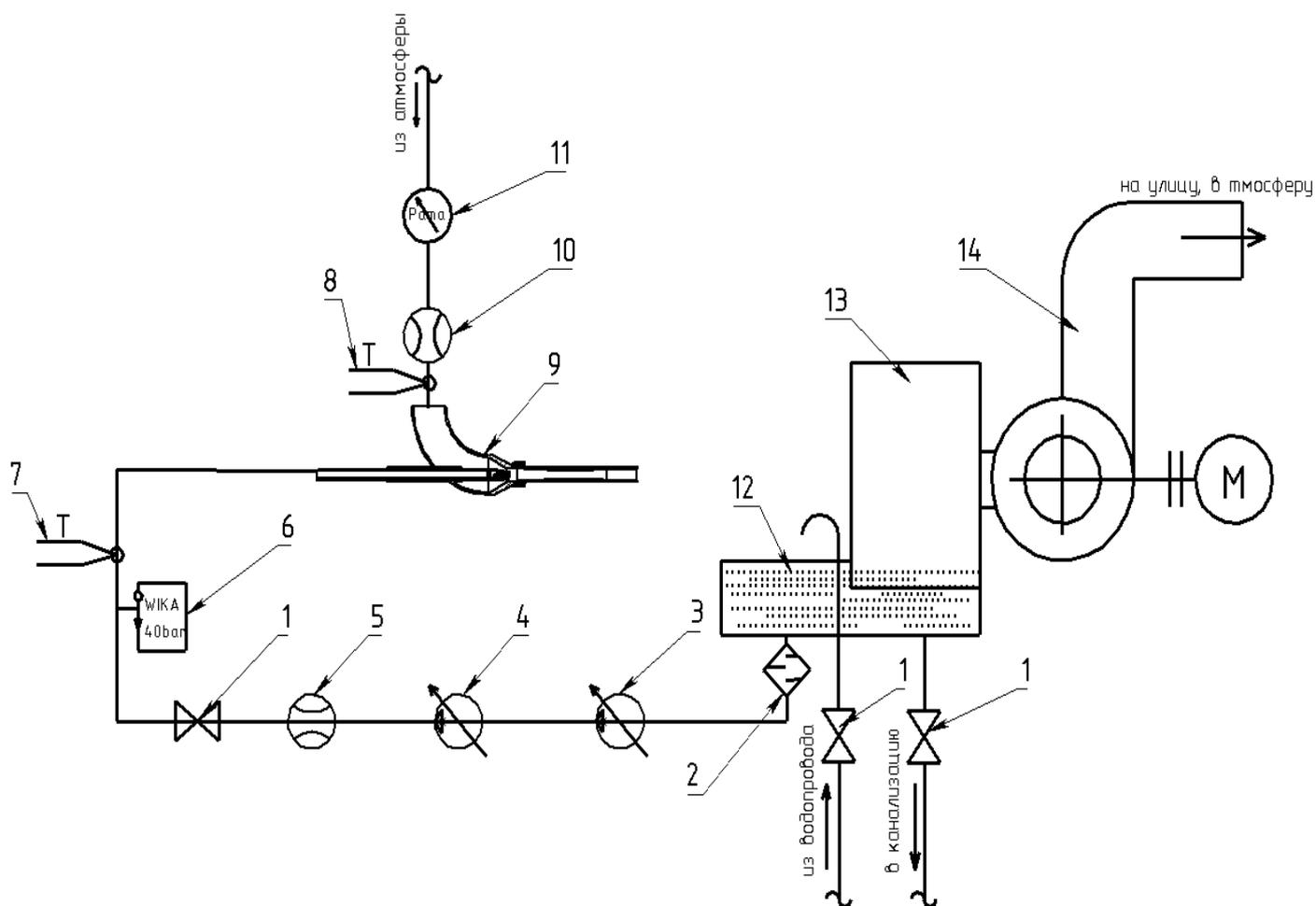


Рисунок 22. Гидравлическая схема стенда.

Где:

1. Шаровые запорные вентили.
2. Фильтр тонкой очистки воды.
3. Насос «Grundfos CR10-14».
4. Насос «Grundfos CRE 1-36».
5. Турбинный измеритель расхода жидкости.
6. Датчик избыточного давления жидкости перед смесителем.
7. Датчик температуры жидкости.
8. Датчик температуры эжектируемого воздуха.
9. Жидкостно-газовый двухфазный эжектор.
10. Расходомер воздуха BOSCH HFM-5.
11. Образцовый вакуумметр.
12. Ванна-бак рабочего тела.

13. Сепаратор.

14. Вытяжной вентилятор.

### **3.1.2. Автоматизированная система управления**

Автоматизированная система управления стенда позволяет изменять расходы рабочих тел ЖГСА по программе путем регулирования частоты вращения насосов подачи и расходных клапанов воздуха. Для исследования ЖГСА в качестве устройства формирования двухфазной струи предусмотрена система перемещения объекта исследования по X и Y координатам для анализа состава и параметров струи на удалении от среза сопла. Перемещение объекта может осуществляться, как в ручном режиме, путем задания координат перемещения оператором, так и в автоматическом, по программе.

Система перемещения разработана и изготовлена фирмой ISELGERMANYAG и представляет из себя две шариковинтовые пары с шаговыми двигателями и многоосевой контроллер управления IMS-S8 с драйверами шаговых двигателей, который по протоколу RS 232 связан с персональным компьютером оператора стенда. Контроллер IMS-S8 представляет собой свободно программируемый компактный контроллер для линейных или круговых осей с двухфазными шаговыми двигателями. Контроллер включает в себя все необходимые компоненты (источник питания, схемы безопасности, силовой электроники, ядерный процессор, интерфейсы, рабочие элементы), которые необходимы для управления. Он имеет также интеллектуальный модуль (ядро), который управляется и программируется через интерфейс RS232. Основной модуль преобразует команды, записанные пользователем в файле программы, в тактовые сигналы. В зависимости от задачи ИМС-S8 может быть использован, как в режиме ЧПУ, так и в режиме ДПУ. В режиме ЧПУ, процессор обрабатывает программу ЧПУ, которая ранее написана в PAL-PC и хранится во флэш-памяти контроллера. В режиме ДПУ, контроллер ИМС-S8 соединен постоянно с управляющим компьютером через последовательный интерфейс (RS232). Управление приводами и положением объекта исследования осуществляется утилитой, написанной

на языке программирования LABVIEW (Рисунок 23).



Рисунок 23. Лицевая панель программы управления положением объекта исследования

### 3.1.3. Система измерения, регистрации и обработки параметров струи

Сигналы со всех электронных средств измерений выводятся на персональный компьютер оператора, где регистрируются и обрабатываются, и представляются в виде отчетов. Для различных задач и типов испытаний предназначены различные программы для ПЭВМ:

- Программа для измерения дисперсности потока методом малоуглового рассеивания написана на языке Labview и представляет из себя сборку из регистрирующей части для управления параметрами съёмки, выполняемой фотоаппаратом Canon, передачи файлов изображений для последующего анализа на ПК оператора и обрабатывающей части, которая проводит анализ изображения по интенсивности и выполняет обработку и расчет по инвариантам

малоуглового рассеивания и построение распределения размеров и отображения основных характеристик потока. Программа имеет возможность загрузки и потокового анализа ранее отснятых изображений, по команде происходит генерация файлов отчета в Microsoft Excel.

- Программа для скоростной видеосъемки и анализа скорости, размеров и распределения частиц.
- PIV метод фирмы Lavisision [183]. Программа включает в себя регистрирующую и обрабатывающую часть и позволяет регистрировать скорости различных потоков в трех измерениях, образуя объемные поля векторов скоростей. Метод основывается на изменении корреляционной функции по двум кадрам съемки потока, освещенного лазерным ножом. При обработке полученное изображение разбивается на прямоугольные ячейки. В пределах каждой ячейки вычисляется кросскорреляционная функция, положение максимума которой и принимается за скорость (Рисунок 24). По результатам вычисления скоростей в ячейках получается поле скоростей. Для того чтобы измерить поле скоростей методом PIV в исследуемом объеме, необходимо лазерным «ножом» произвести измерения в различных сечениях, передвигая объект исследования с помощью системы позиционирования по оси X. Использование двух камер существенно снижает уровень шума, вызванного взаимным расположением частиц в пространстве. Также отметим, что метод работоспособен и при высокой концентрации частиц, в этом случае ищется перемещение корреляций световых полей, образованных двумя лазерными импульсами.

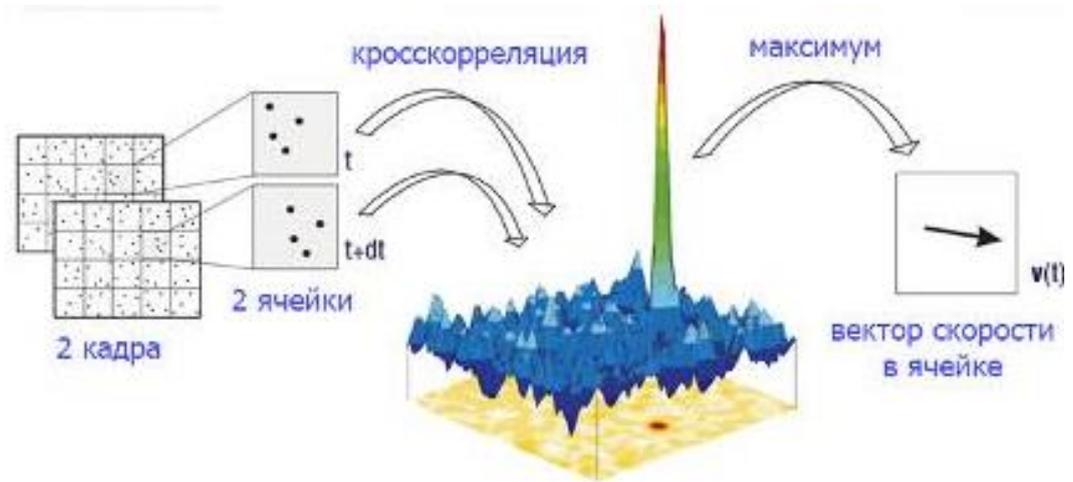


Рисунок 24. Вычисление кросскорреляционной функции в ячейке

- Теневой метод, также входит в программный комплекс Lavigation [183], отвечает за измерение дисперсности потока и построение распределения размеров частиц. Схема метода изображена на рисунке 25. Поток частиц 1 подсвечен системой освещения 2, в которую входит либо мощный лазер, либо лампа. Свет проходит через рассеиватель 3, приобретая равномерную структуру, и освещает частицы; тень от частиц попадает на CCD камеру 4, через длиннодистанционный микроскоп 5. С камеры изображение попадает в ПЭВМ оператора и происходит анализ, поиск круглых структур с замкнутым контуром и вычисление их размера. Выводятся параметры потока: диаметры капель, распределение, скорости X и Y.

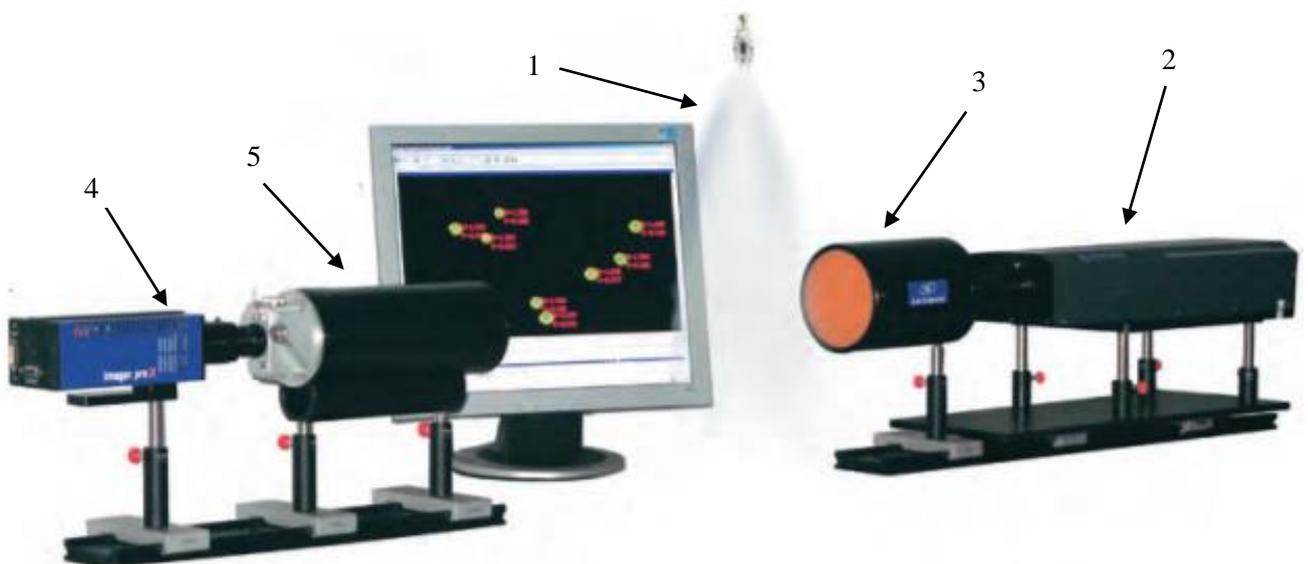


Рисунок 25. Теневой метод Lavigation

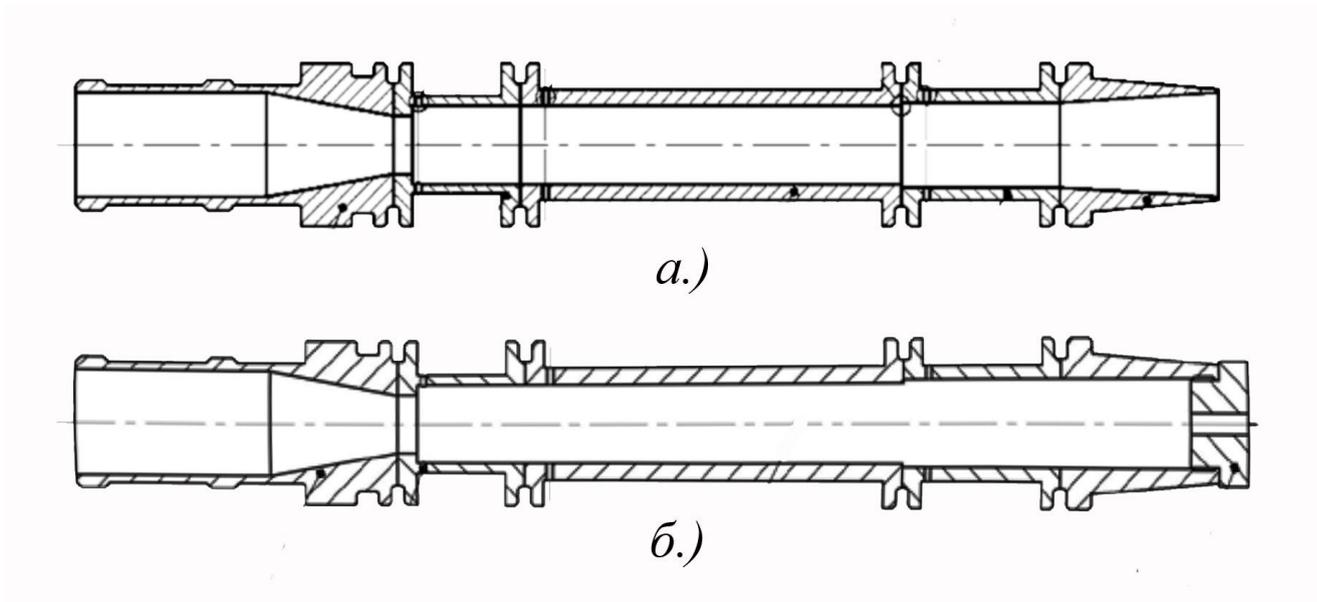
## **3.2. Испытания смесительного элемента эжектора**

В данном разделе рассматриваются экспериментальные исследования, ориентированные на определение влияния различных параметров форсунки на работу двухфазного жидкостно-газового эжектора.

### **3.2.1. Испытания пластиковых образцов для определения оптимальной формы форсунки двухфазного жидкостно-газового эжектора**

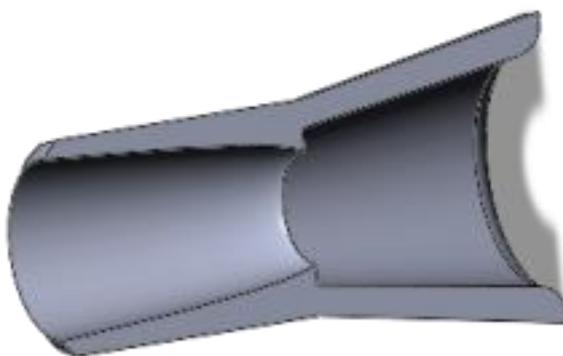
Для сравнения влияния геометрических параметров форсунки на коэффициент эжекции, скорость струи на выходе и остаточное абсолютное давление воздуха на входе в эжектор были проведены предварительные испытания различных форм форсунок. Первоначально конструирование форсунок было основано на исследованиях авторов, перечисленных в первой главе диссертации и собственных работах [72,98,99,100,101,102]. В связи со значительными потерями, выраженными в низком коэффициенте расхода порядка 0,6 для смесительных устройств с открытой [98] и закрытой [72, 99] схемами (Рисунок 26.) и недостаточной передачей кинетической энергии жидкости эжектируемому воздуху, из-за недостаточной диспергированности. Было принято решение отказаться от схем, предложенных в указанных выше работах, и провести дополнительные исследования на предмет изменения конфигурации смесителя, отказаться от истечения двухфазного тела из отверстия и перейти к регулируемой щелевой форсунке. В процессе экспериментов были учтены недостатки и разработана принципиально новая конструкция форсунки. Все смесительные устройства проектировались на расход жидкости 200-300 граммов и перепад давления 20-30 атмосфер.

Для сокращения временных и материальных затрат на производство форсунок они изготавливались методом стереолитографии (выращивались). Далее приводятся модели испытанных форсунок и описание результатов.



*Рисунок 26. а.) смеситель открытого типа, б.) смеситель закрытого типа.*

Форсунка с одним отверстием и Рисунок 27 является базовой для водоструйных аппаратов. Основным недостатком данной форсунки является отсутствие развала струи на большом расстоянии от среза форсунки, данный факт существенно увеличивает область взаимодействия жидкости с воздухом и влияет на длину камеры смешения. Наличие диффузора влияет на сокращение длины смешивания несущественно.



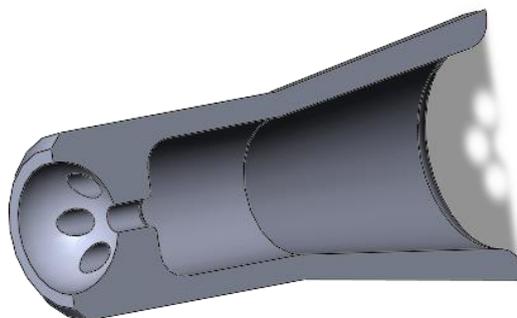
*Рисунок 27. 3D модель струйной форсунки с одним отверстием и диффузором.*

Ниже (Рисунок 28 и Рисунок 29) приведены 3D модели струйных форсунок с несколькими периферийными отверстиями, данная конструкция является логическим выводом из описанных в первой главе диссертации многосопловых струйных аппаратов. В процессе экспериментов данные форсунки показали отличающиеся в

лучшую сторону параметры коэффициента эжекции и разрежения на входе в эжектор. Без существенных потерь по скорости струи у данных форсунок наблюдался существенно лучший угол распыла, меньшая дисперсность и область взаимодействия струи жидкости с эжектируемым воздухом снизилась существенно.



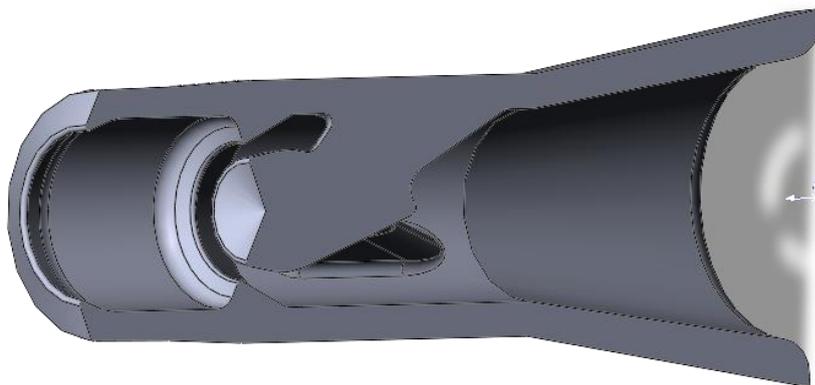
*Рисунок 28. 3D модель струйной форсунки с семью отверстиями.*



*Рисунок 29. 3D модель струйной форсунки с семью отверстиями и диффузором*

Проанализировав проведенные испытания, было решено спроектировать форсунку, имеющую кольцевую щель с коэффициентом расхода соответствующим предыдущим форсункам с отверстиями. Щель образовывалась размещенным на пилонах центральным телом форсунки и острой кромкой её корпуса (Рисунок 30). Угол распыла для данной форсунки был максимальным из испытанных, а дисперсность минимальной (40-300 мкм), наблюдался стабильный распад струи на небольшом расстоянии от среза форсунки, длина взаимодействия с эжектируемым воздухом была

минимальна. Для последующих испытаний была принята данная концепция проектирования форсунки.

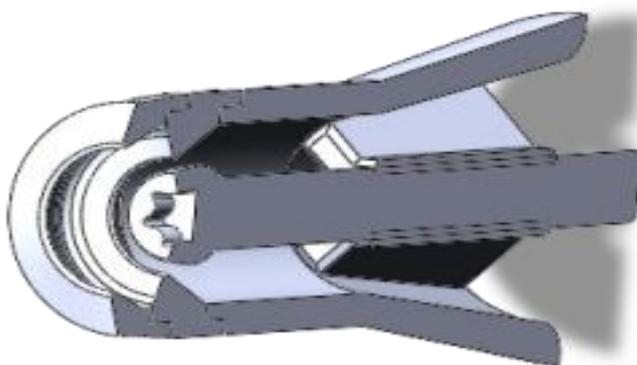


*Рисунок 30. 3D модель струйной форсунки с одним щелевым отверстием и центральным телом на пилонах*

Применение центробежных форсунок в струйных аппаратах не актуально из-за особенностей конструкции смесительных устройств данного типа, так как большое количество кинетической энергии жидкости тратится на закрутку потока, хотя дисперсность у данных смесителей ниже.

### **3.2.2. Испытания металлической форсунки двухфазного жидкостно-газового эжектора на различных режимах работы**

Исходя из анализа работы струйных форсунок с различными конфигурациями отверстий, была разработана и изготовлена в металле следующая струйная форсунка (Рисунок 31).



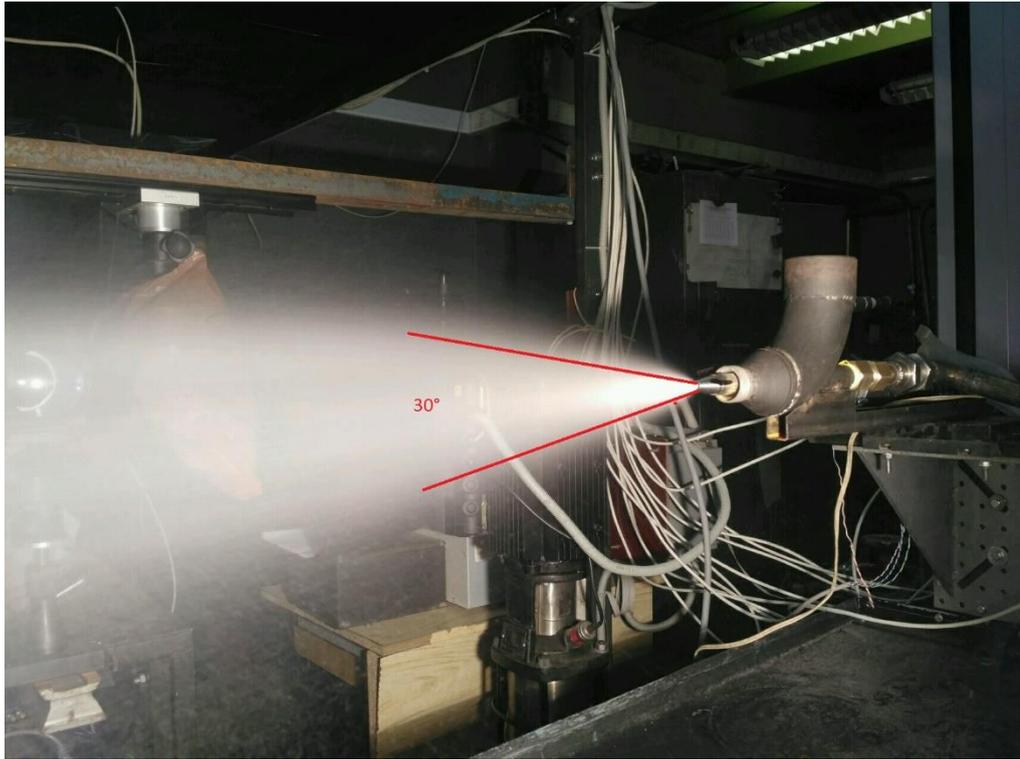
*Рисунок 31. 3D модель струйной форсунки с кольцевым каналом подачи и возможностью регулирования расхода жидкости*

Форсунка состоит из пяти частей: внутреннего перекрестья, в которое ввернуто центральное тело корпуса форсунки, острокрытой шайбы камеры и острокрытой шайбы корпуса. Перекрестие вставлено в корпус с ввернутым регулировочным винтом и зафиксировано лазерной сваркой, concentricность обеспечивается посадкой центрального пилоновидного тела по конусу корпуса форсунки. Шайбы одеты друг на друга с натягом и сварены между собой и корпусом форсунки лазерной сваркой (Рисунок 32). Корпус и пилоновидное тело форсунки изготовлены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т, шайба камеры и острокрытая шайба изготовлены из 14Х17Н2 и закалены для упрощения изготовления острой кромки форсунки.

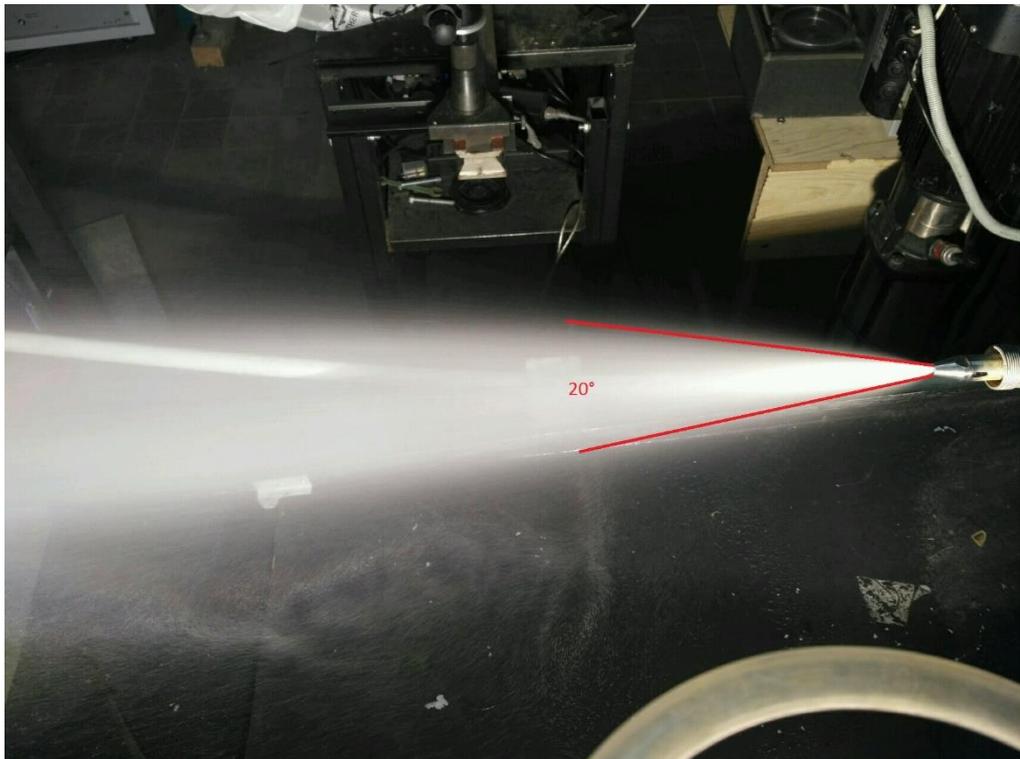


*Рисунок 32. Фотография составных частей струйной форсунки с регулируемым расходом*

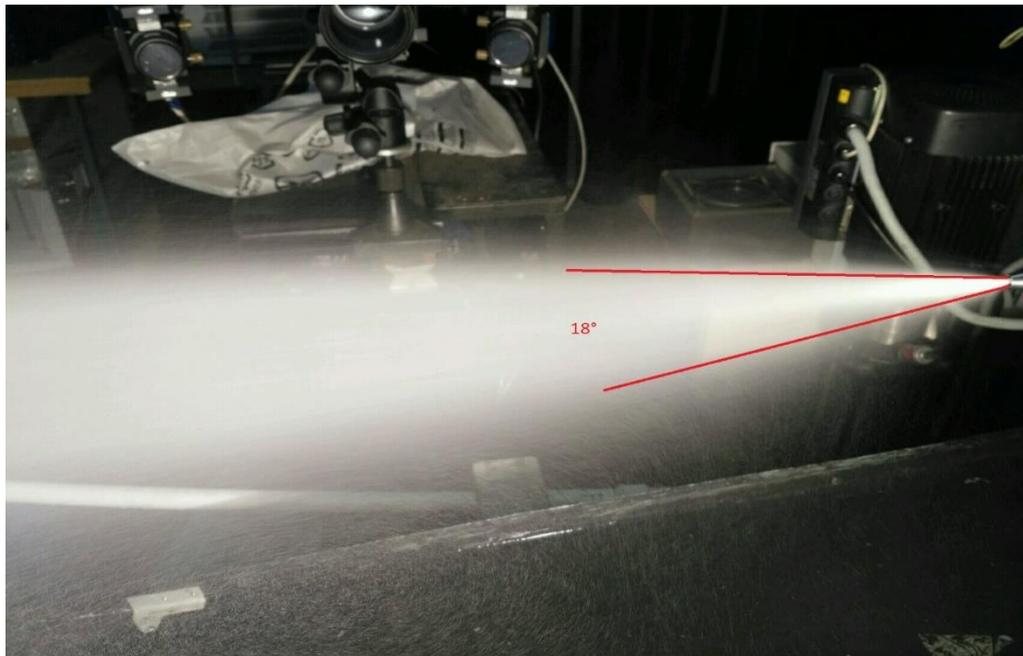
Далее приводятся фотографии угла распыла форсунки при различных расходах жидкости (Рисунок 33-Рисунок 36). Перепад давления на форсунке составлял 27 атмосфер, изменялся расход и проходное сечение форсунки. Угол распыла уменьшался по мере снижения расхода жидкости.



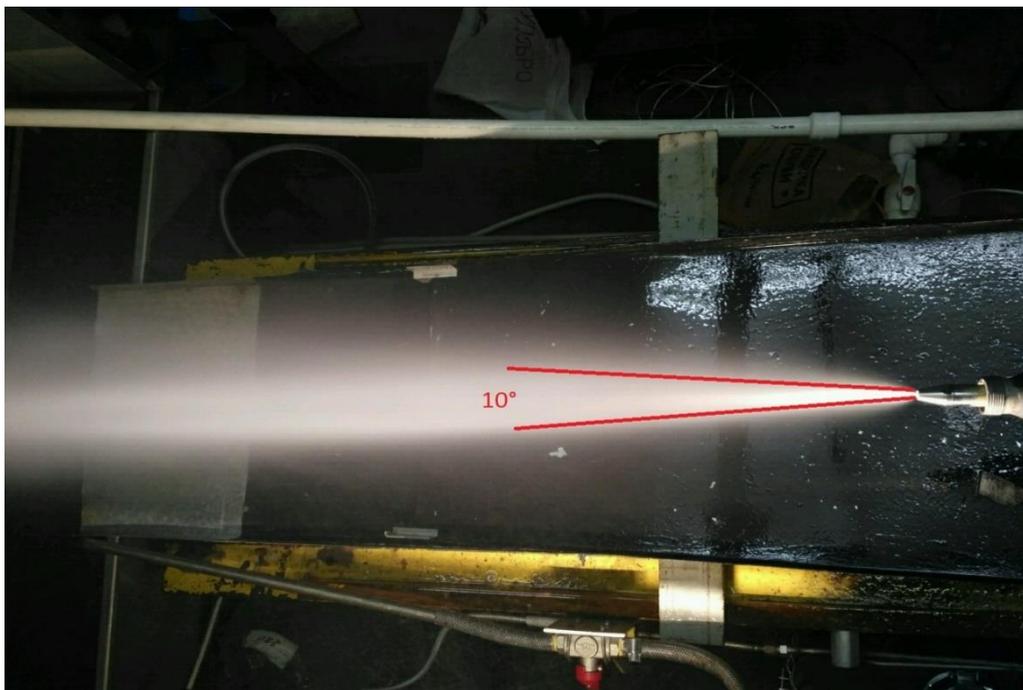
*Рисунок 33. Угол распыла при расходе жидкости 275 г/с*



*Рисунок 34. Угол распыла при расходе жидкости 240 г/с*



*Рисунок 35. Угол распыла при расходе жидкости 205 г/с*



*Рисунок 36. Угол распыла при расходе жидкости 170 г/с*

Методом PIV были отсняты скорости дисперсной фазы на каждом режиме работы форсунки (Рисунок 37-Рисунок 40). Из полей скоростей видно, что метод PIV достаточно корректно отражает изменение угла распыла струи, зафиксированного выше фотографическим методом. При расходе 175 г/с наблюдается существенное падение скорости потока уже на расстоянии 600мм от среза форсунки.

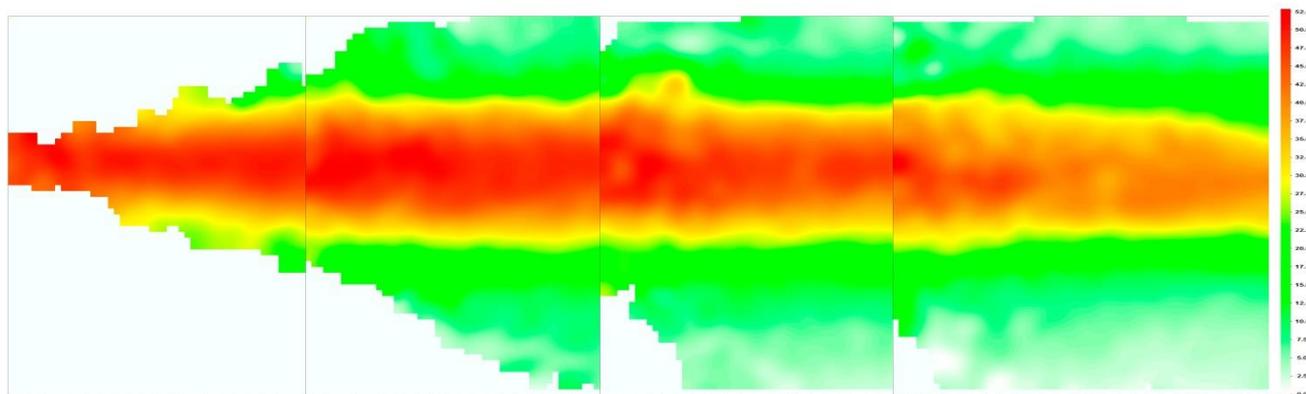


Рисунок 37. Поле скоростей форсунки, снятое методом PIV при расходе жидкости 275 г/с,  $V_{\text{макс}}$  52 м/с

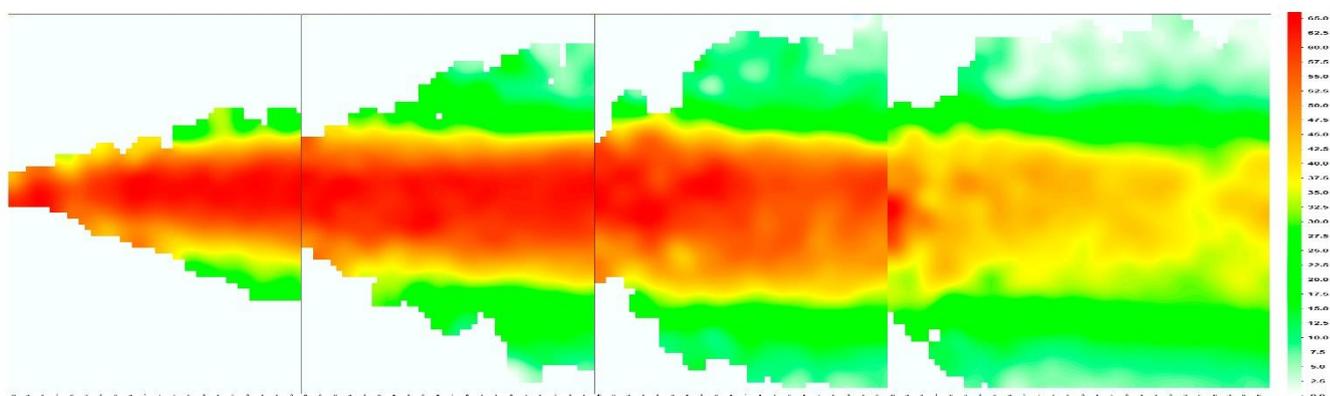


Рисунок 38. Поле скоростей форсунки, снятое методом PIV при расходе жидкости 240 г/с,  $V_{\text{макс}}$  65 м/с

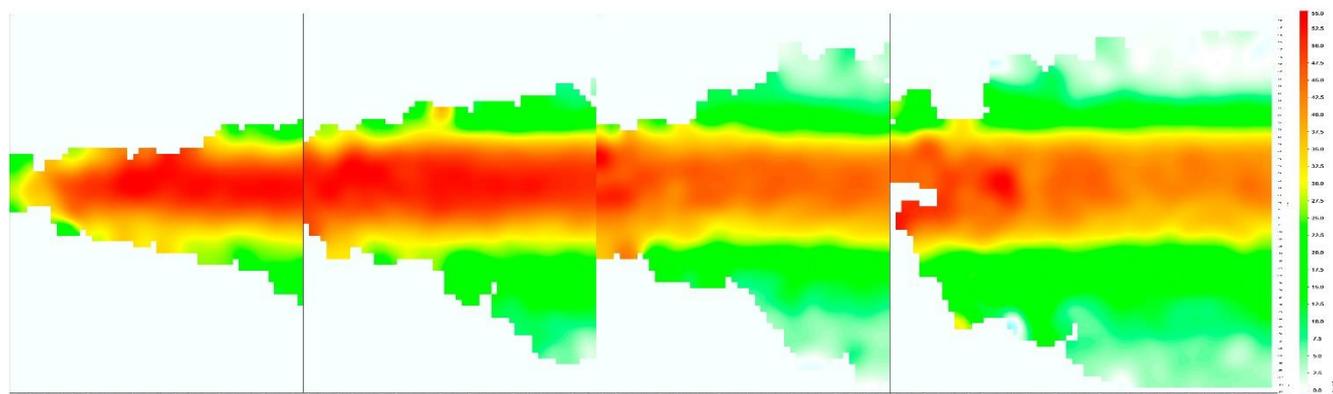


Рисунок 39. Поле скоростей форсунки, снятое методом PIV при расходе жидкости 205 г/с,  $V_{\text{макс}}$  55 м/с

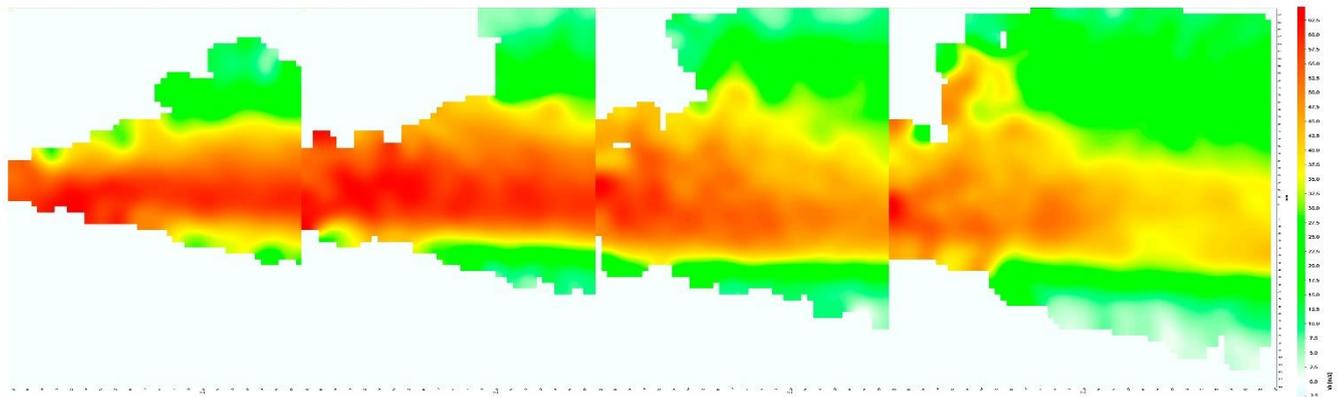


Рисунок 40. Поле скоростей форсунки, снятое методом PIV при расходе жидкости 170 г/с,  $V_{\text{макс}} 55 \text{ м/с}$

После осреднения по количеству экспериментов и фотографий для анализа результатов экспериментов были построены графики продольных скоростей вдоль оси X, отражающие изменение скорости капель дисперсного потока струйной регулируемой форсунки (Рисунок 41). При увеличении расхода жидкости через форсунку наблюдается повышение скорости потока. Самым оптимальным для данной конструкции форсунки является расход жидкости 240 г/с, при расходе 275 г/с скорость потока отличается от оптимальной незначительно [105,103].

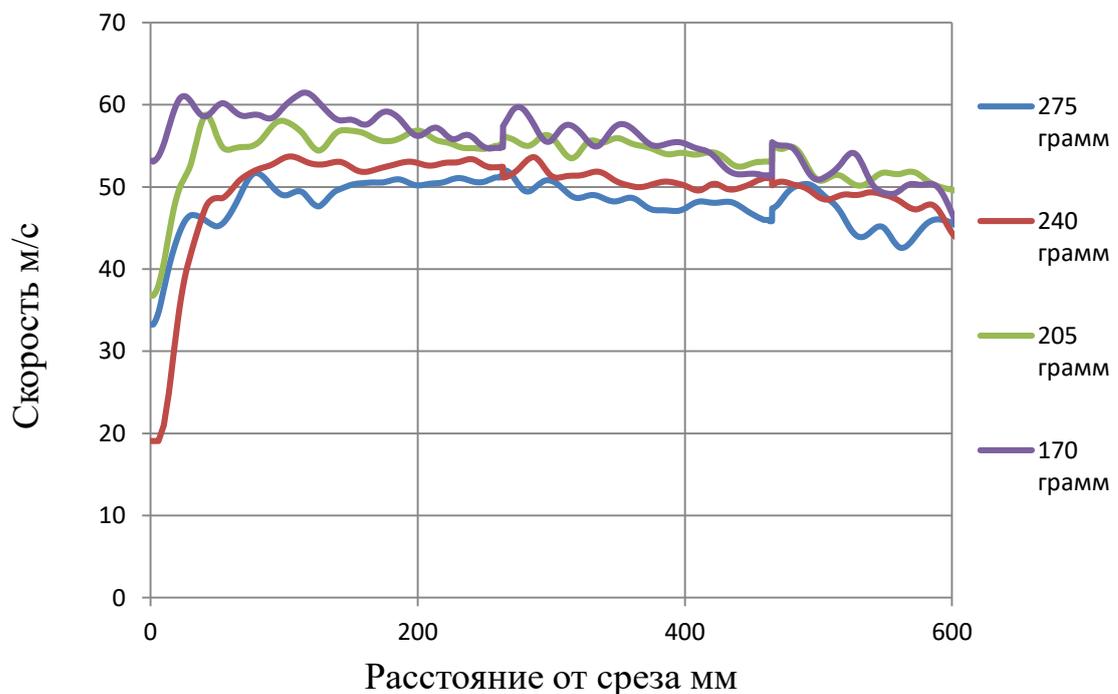
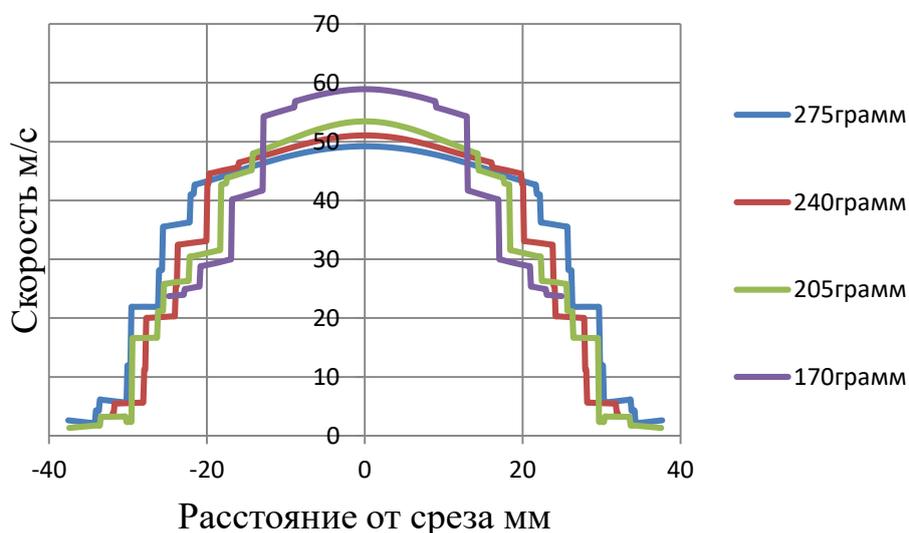


Рисунок 41. Зависимость скорости струи от удаления от среза форсунки вдоль струи при различных расходах жидкости

Помимо продольных проекций скоростей были построены скорости в поперечном сечении относительно струи форсунки, расстояние замера составляло 40мм. Выбор данного удаления от среза форсунки обуславливается тем, что при проведении предварительных испытаний наилучший режим работы по параметрам максимального разрежения и эжектируемого расхода воздуха был достигнут именно на расстоянии 40мм от полного перекрытия проходного сечения расхода воздуха центральным телом эжектора. На зависимостях (Рисунок 42) наглядно отображен рост скорости потока при понижении расхода жидкости при постоянном давлении и уменьшении угла распыла.



*Рисунок 42. Зависимость скорости струи в поперечном сечении на расстоянии 40мм от среза форсунки при различных расходах жидкости*

Данный факт следует связывать также с уменьшением размеров капель при изменении расхода жидкости на форсунку при постоянном давлении.

### **3.2.4 Определение размеров скорости и распределения дисперсной фазы методом микроскопической высокоскоростной съемки**

Для уверенности в точности результатов измерения скорости потока методом

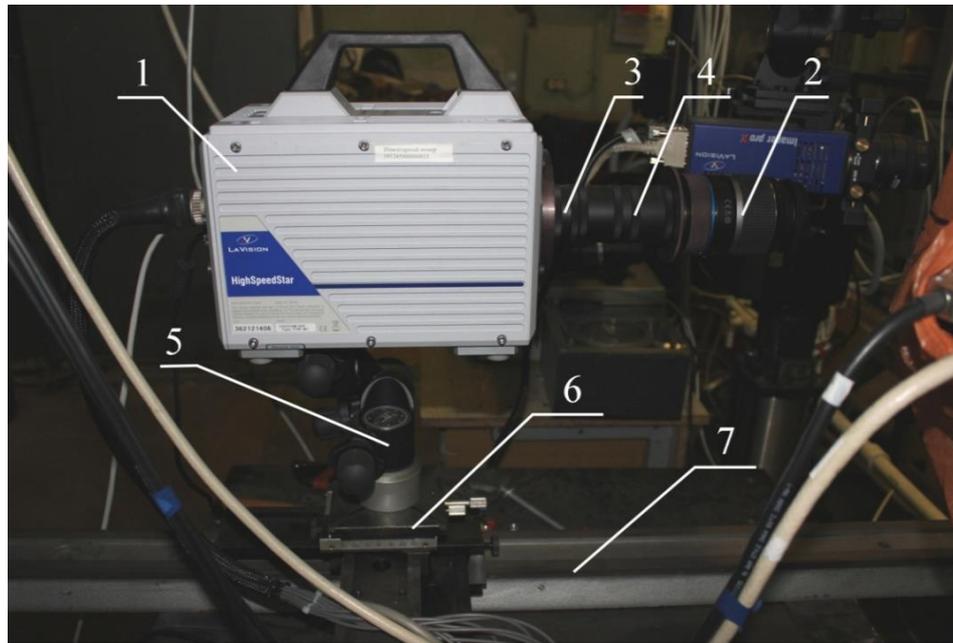
PIV были проведены испытания с использованием высокоскоростной камеры FASTCAM SA5, максимальная скорость съемки которой составляет 775000 кадров в секунду (99).



*Рисунок 43. Высокоскоростная камера FASTCAM SA5*

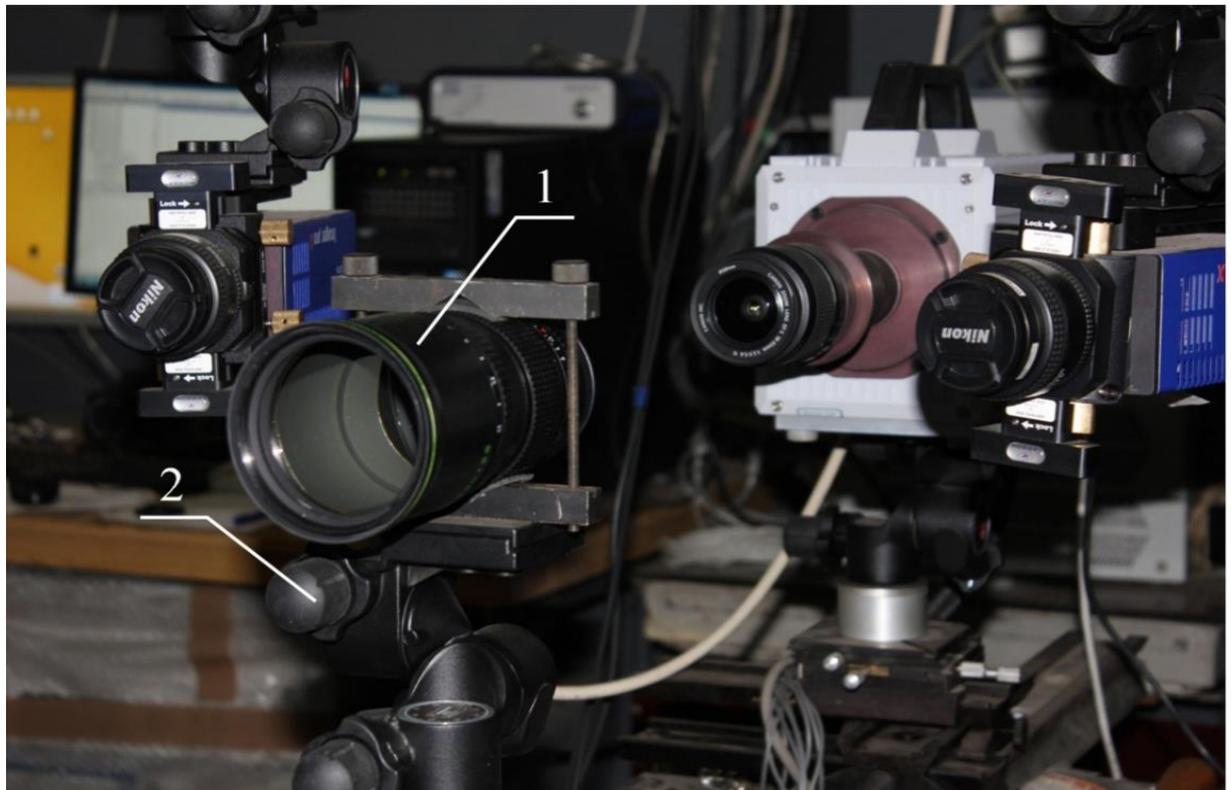
Штатным объективом этой камеры является объектив Nikon типа Nikkor, фокусное расстояние 50 мм, относительное отверстие 1:1.2. Это - светосильный объектив, позволяющий получать кадры с высоким разрешением. Но при регистрации изображений с расстояния 500 мм и более для оценки размеров и формы частиц желательно использовать объектив с большим фокусным расстоянием. Поэтому для расширения возможностей камеры был разработан и изготовлен специальный переходник - тубус, позволяющий использовать объективы Canon. В экспериментах использовался объектив Canon с переменным фокусным расстоянием 75-300 мм.

На цифровую видеокамеру 1 (Рисунок 44) установлен объектив 2 Canon с переменным фокусным расстоянием 75-300 мм при помощи переходника 3 и переходных колец 4. Камера установлена на короткий фотографический штатив 5, позволяющий юстировать её по трём углам. Штатив закреплён на столике 6, который имеет два горизонтальных перемещения. Вся конструкция установлена на короткой оптической скамье 7.



*Рисунок 44. Фотография цифровой видеокамеры с переходным устройством*

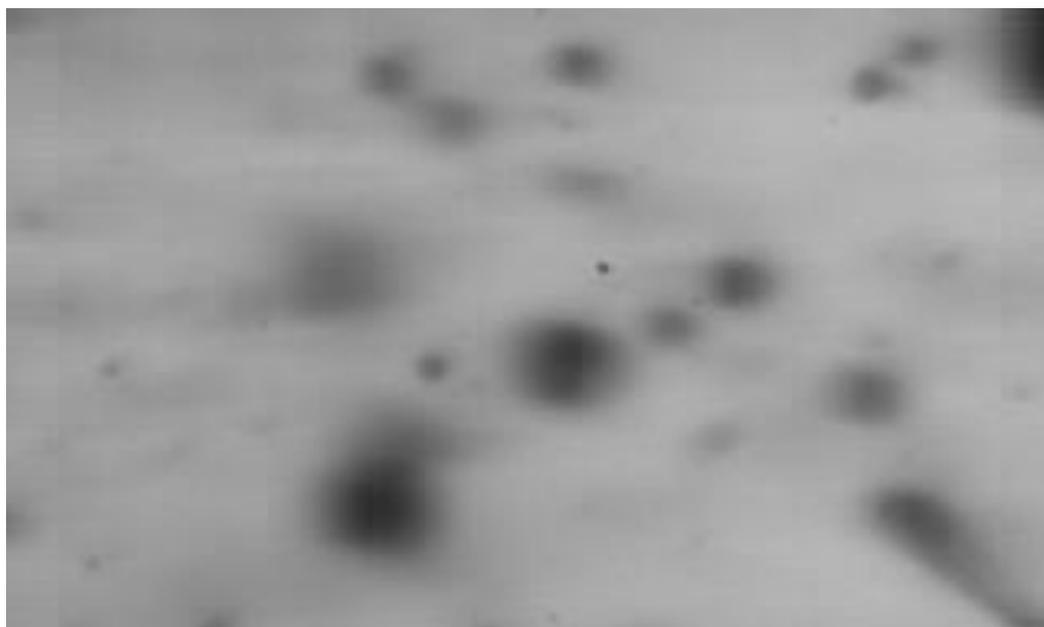
При большем расстоянии (а в основном измерения проводились на расстоянии 300-350 мм от среза форсунки) использовался дополнительный объектив Юпитер 36-Б 3.5/250.



*Рисунок 45. Фотография цифровой видеокамеры с дополнительным объективом Юпитер 36-Б 3.5/250*

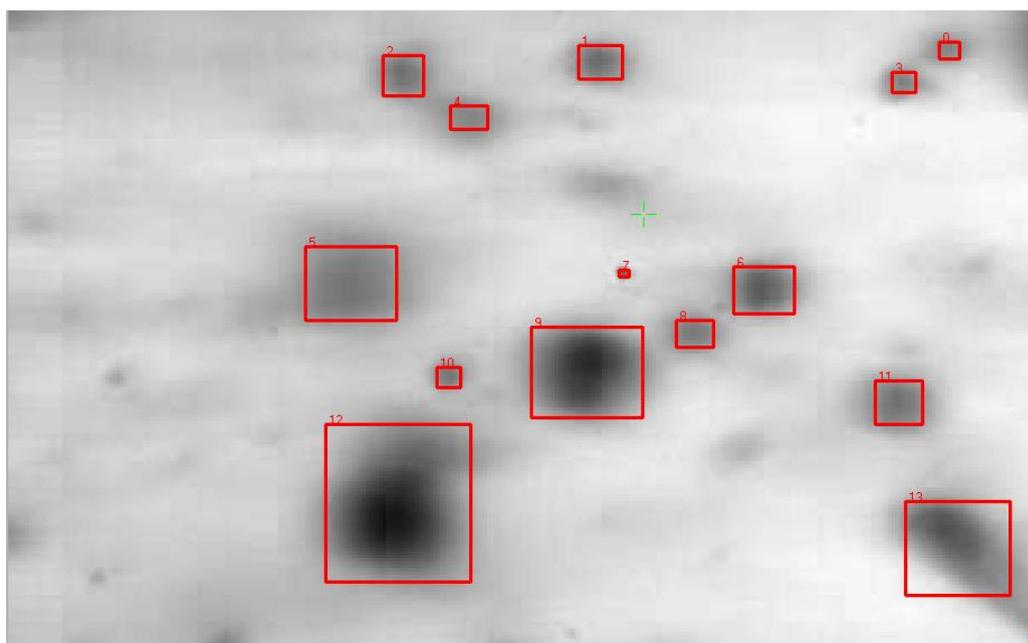
Объектив Юпитер 36-Б 3.5/250 (позиция 1, Рисунок 45 ) установлен на коротком фотографическом штативе (позиция 2), который даёт возможность юстировать его по трём углам. Штатив установлен на рейтере, который может перемещаться по оптической скамье. Объектив переносит изображение измерительного объёма в масштабе 1:1 (приблизительно) в область, регистрируемую цифровой видеокамерой. Это позволяет защитить оптику от действия струи. Отметим, что переходник – тубус для цифровой видеокамеры здесь также используется. Для освещения потока используется мощная лампа, направленная перпендикулярно камере с противоположной стороны потока.

После настройки оптической системы определяется масштаб, с которым будут регистрироваться изображения. Для этого в измерительный объём устанавливается стекло с шкалой 0,01 мм и измеряется размер кадра по высоте и ширине. Размер кадра в пикселях является известной величиной и определяет увеличение системы и масштабный фактор, значения которых вводятся в программу обработки. Иногда масштабный фактор определялся по фотографии масштабной линейки. Проводилась регистрация изображений. Для этого используется специальная регистрирующая программа, которая написана на языке LabVIEW. Регистрирующая программа отвечает за параметры съёмки камеры (частота кадров, выдержка, разрешение кадра) и сохранение кадров на ПЭВМ. Пример полученного изображения показан на рисунке 46.

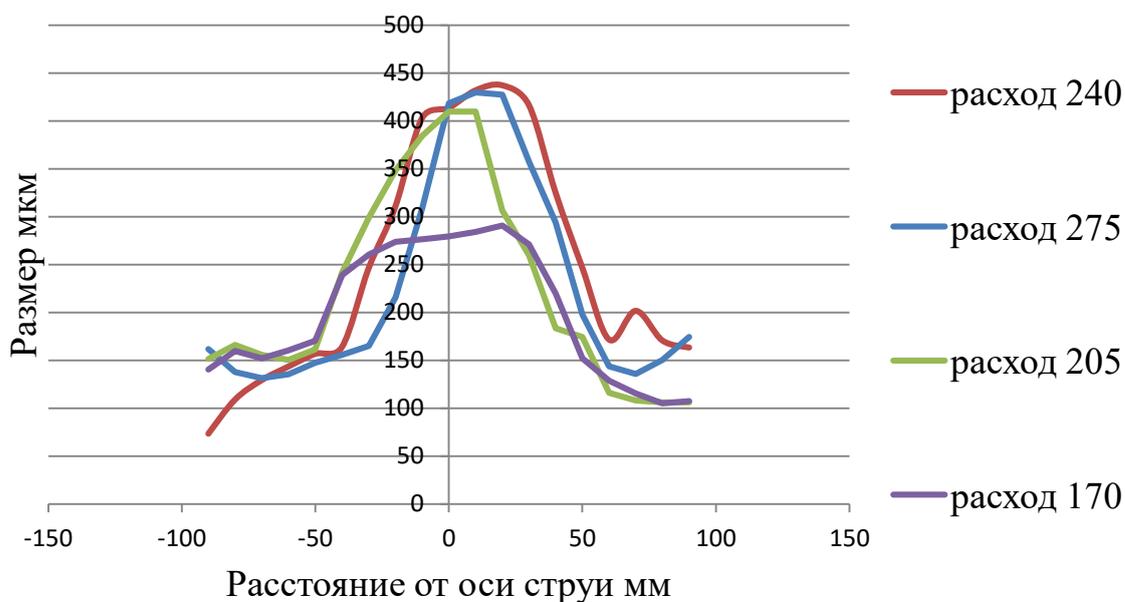


*Рисунок 46. Пример фотографии капель.*

Оригинальная расчетная программа, написанная на языке LabVIEW, отвечает за определение размеров частиц по фотографии и построение распределения частиц по размерам (99). Изображение получено при освещении мощной лампой, поэтому частицы на изображении темнее фона. Программа проводит пиксельный анализ фотографии: ищет пиксели, градации серого которых ниже интенсивности общего фона, формирует из них круговые агломерации и выделяет круговые структуры капель на анализируемой фотографии. Кроме того, осуществляется подсчёт числа капель. При этом каждой капле присваивается свой номер. Вычисление диаметра капли производится через площадь описанного вокруг нее прямоугольника или квадрата (Рисунок 47), а полученный в пикселях диаметр умножается на размер пикселя, найденный при тарировке.



*Рисунок 47. Пиксельный анализ изображения*

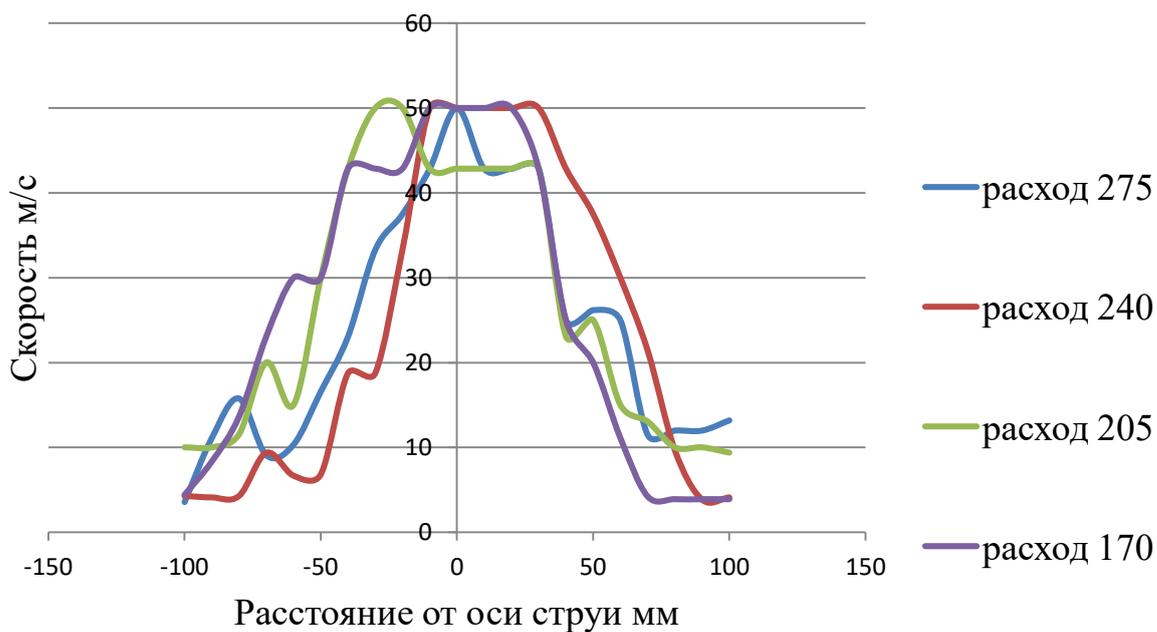


*Рисунок 48. Зависимость размера капель от расстояния по сечению струи*

Эксперименты проводились на расстоянии от среза форсунки 40 мм для того чтобы определить параметры дисперсной фазы на входе в камеру смешения эжектора. Полученные результаты анализа дисперсности вместе с анализом количества эжектируемого воздуха на разных режимах позволяют сделать вывод, что размер дисперсной фазы оказывает существенное влияние на эжектирующую способность ЖГСА. Также стоит отметить, что из-за большого количества набегающего воздуха в эжекторе распыл существенно улучшается, что видно на (Рисунок 49) при съемке работы форсунки в составе эжектора видеоэндоскопом.



*Рисунок 49. Фотография работы форсунки в ЖГСА выполненная видеоэндоскопом.*



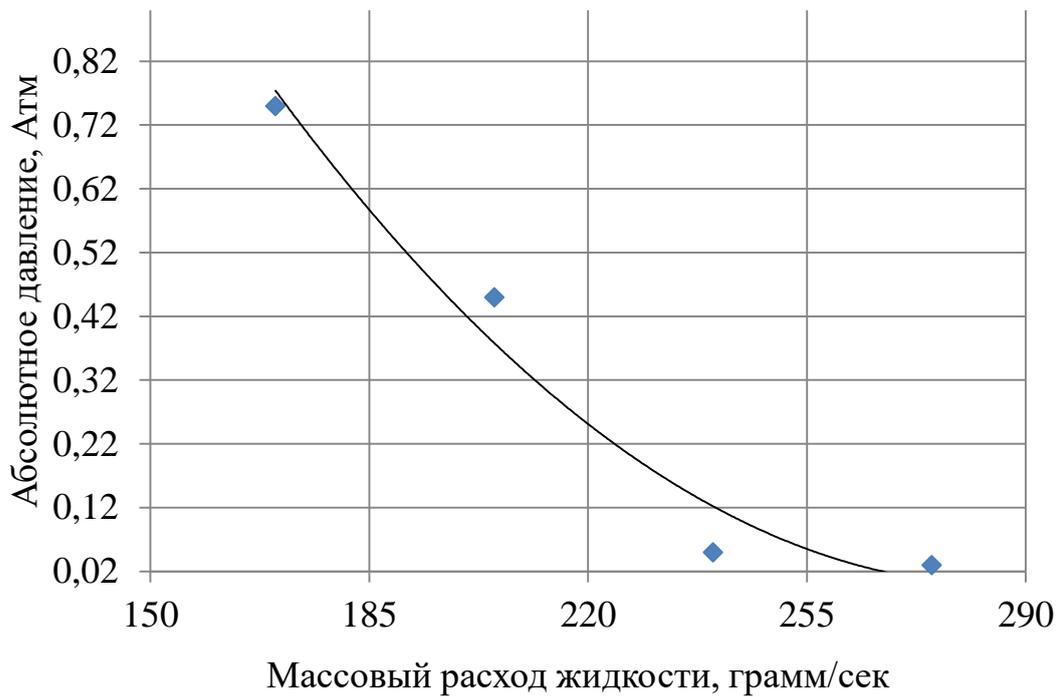
*Рисунок 50. Зависимость скорости капель от расстояния по сечению струи*

Скорость капель, отображённая на графике (Рисунок 50), определяется с помощью высокоскоростной камеры следующим образом: известными для нас являются параметры длины и ширины кадра 3мм X 1мм, частота съемки тоже задается экспериментатором 70000 кадров в секунду, поэтому сопоставив за какое количество кадров капля пролетает расстояние, равное его длине, мы можем точно определить скорость капли. Перемещаясь по высоте получим локальные скорости потока с шагом 5мм.

### **3.3.1. Испытания жидкостно-газового эжектора на максимальное разрежение газа на входе.**

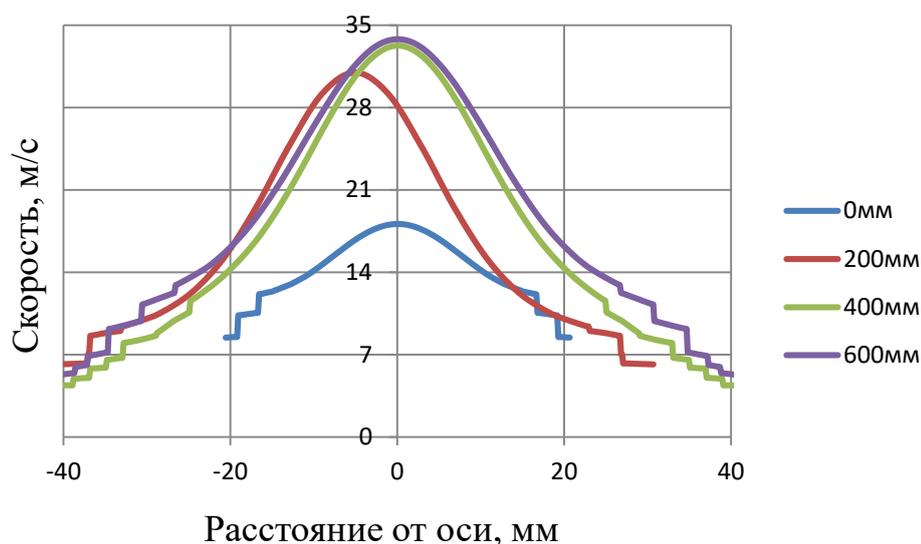
В результате испытаний было измерено абсолютное давление при различном расходе жидкости. Замеры давления производились путем закрывания входа в эжектор и измерения абсолютного давления в откачиваемом объеме. Зависимость абсолютного давления от массового расхода жидкости приведена на рисунке 51. Из рисунка видно,

что данный эжектор позволяет получить абсолютное давление до 0,02 атм.



*Рисунок 51. Зависимость абсолютного давления на входе в эжектор от расхода рабочей жидкости.*

Для оценки эффективности спроектированного ЖГСА необходимо получить зависимость расхода эжектируемого воздуха от абсолютного давления на входе в эжектор, и вычислить энергетическую эффективность ЖГСА. Ниже приведен график четырех поперечных сечений скоростей вектора  $X$  двухфазной струи истекающей из эжектора. На данном графике видно ускорение двухфазной струи на участке 0-350 мм от среза сопла.



*Рисунок 52. Профили U-проекции вектора скорости капель на ось X в поперечных сечениях струи на расстояниях 0, 200, 400, 600 мм от среза сопла.*

Получаемые абсолютные давления находятся ниже точки кипения воды при комнатной температуре (Таблица 2) и способствуют улучшению распыла, что оказывает дополнительное положительное действие на создаваемое разрежение и количество эжектируемого воздуха при низких давлениях в откачиваемом объеме. С высокой вероятностью стоит полагать, что при низких абсолютных давлениях режим работы двухфазного СА изменяется с жидкостно-газового на парогазовый, так как жидкость меняет агрегатное состояние. По мере приближения жидкости к срезу сопла давление в струе растет, происходит активная конденсация и на выходе из камеры смешения истекает, струя без видимых пузырей, если предельное абсолютное давление в объеме достигнуто, или же белого молочного цвета, если процесс откачки еще не завершен. Из этого можно предположить, что при использовании жидкостей, имеющих более высокую температуру кипения, возможно достижения ЖГСА более низкого уровня абсолютных давлений.

Рата	Т градусы С
0,01	6,898
0,02	17,20
0,04	28,64
0,1	45,45

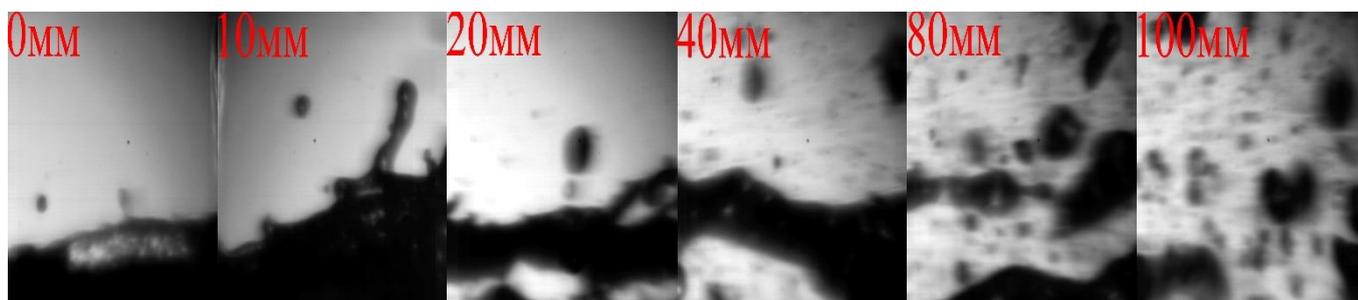
*Таблица 2. Температура кипения воды в зависимости от абсолютного давления окружающей среды.*

### **3.3.2. Испытание жидкостно-газового эжектора в качестве генератора высокоскоростной двухфазной струи.**

Методом PIV производилась съемка двухфазной струи на расстоянии до 800мм от среза сопла, определялось влияние расхода рабочего тела, расхода эжектируемого воздуха, параметров распыла на скорость двухфазной струи на выходе из эжектора.

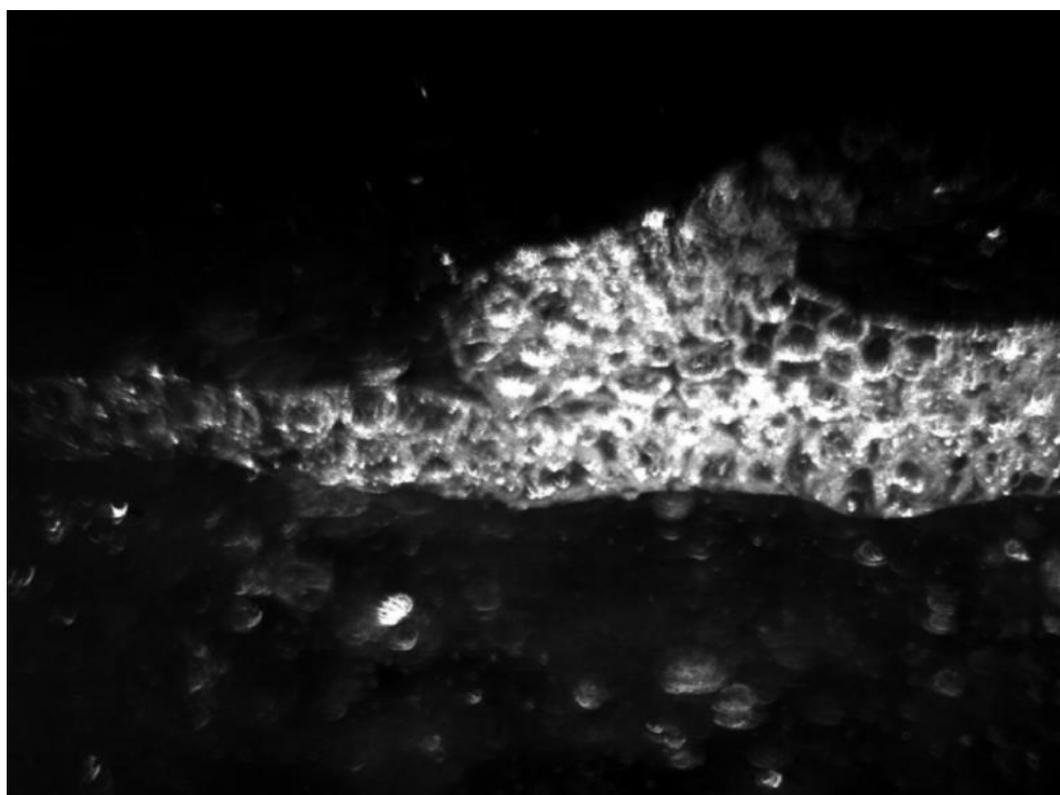
### **3.3.3 Исследование структуры струи двухфазного жидкостно-газового эжектора**

Для эжектора, работающего на различных значениях коэффициента эжекции, на различных расстояниях от среза сопла осуществлялась регистрация изображения с помощью высокоскоростной цифровой видеокамеры. Цель регистрации – оценить изменение формы и структуры струи от расстояния. У среза сопла эжектора (Рисунок 53) видны как отдельные капли, так и участки высокой концентрации жидкости.



*Рисунок 53. Изменение структуры струи эжектора в зависимости от расстояния от среза*

На расстоянии 100 - 300 мм образования жидкой фазы имеют наиболее сложную и не обычную форму (Рисунок 54). Видны и капли, и части плёнки, и пузыри внутри жидкости. На расстоянии 500 мм конгломераты жидкости сложной формы почти не наблюдаются, видны только капли разных размеров, в основном эллипсоидальной формы.



*Рисунок 54. Фотография пузырей в двухфазной струе эжектора*

Это же наблюдается и на большем расстоянии. Таким образом, из приведённых

фотографий видно, что двухфазная струя жидкостно-газового эжектора имеет очень сложную нестабильную форму, которая меняется как от расстояния, так и от количества эжектируемого воздуха. Фотографии, полученные с помощью высокоскоростной камеры, выявили наличие сложной структуры струйного двухфазного потока, что требует самостоятельного изучения, возможно с привлечением других методов экспериментального исследования [105,103].

### 3.4.1. Сравнение результатов численного и экспериментального моделирования рабочих процессов в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе

Сравнение результатов численного моделирования двухфазного ЖГСА (Рисунок 55-Рисунок 58) показало возможность применения пакетов прикладных программ гидрогазодинамики к моделированию процессов внутри и снаружи ЖГСА, погрешность расчетов относительно эксперимента составила не более 7%. При добавлении в расчет теплового взаимодействия и повышения соответствия проходного сечения между ЦТФ и корпусом путем препарирования форсунки и обмера площадей сечений с микронной точностью возможно уменьшение расхождения расчетов и экспериментов до 4,5-5%.

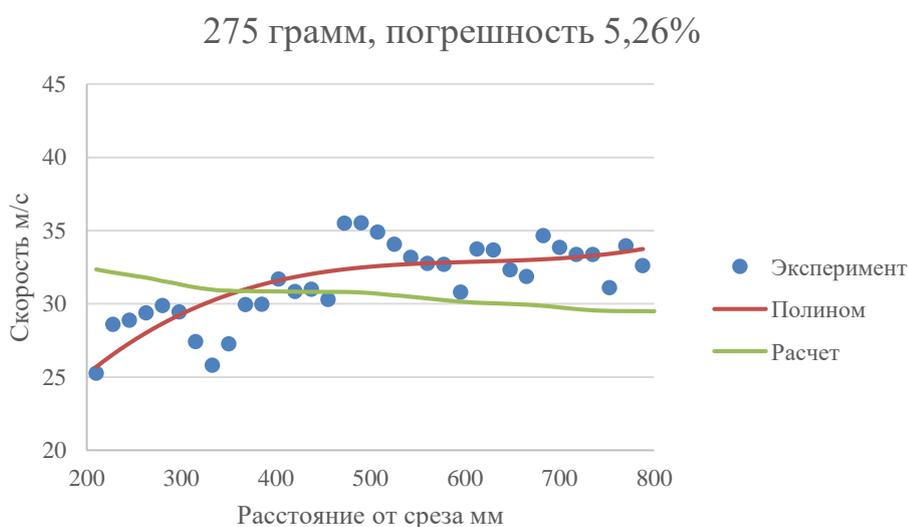


Рисунок 55. Экспериментальная и расчетная скорость двухфазного потока при расходе рабочей жидкости 275 г/с.

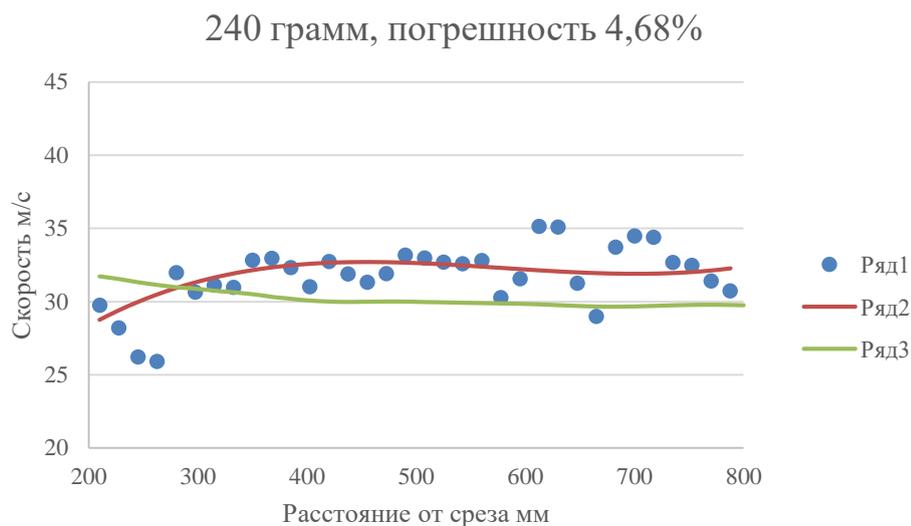


Рисунок 56. Экспериментальная и расчетная скорость двухфазного потока при расходе рабочей жидкости 240 г/с.

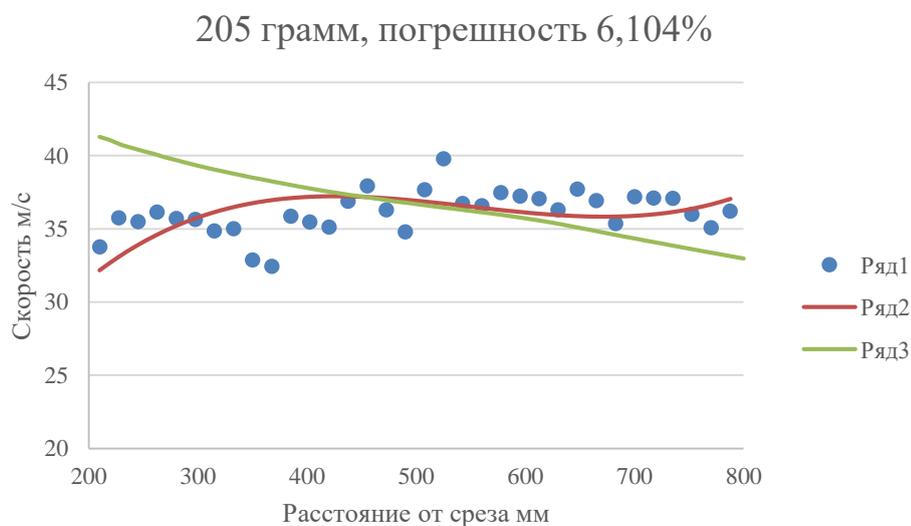
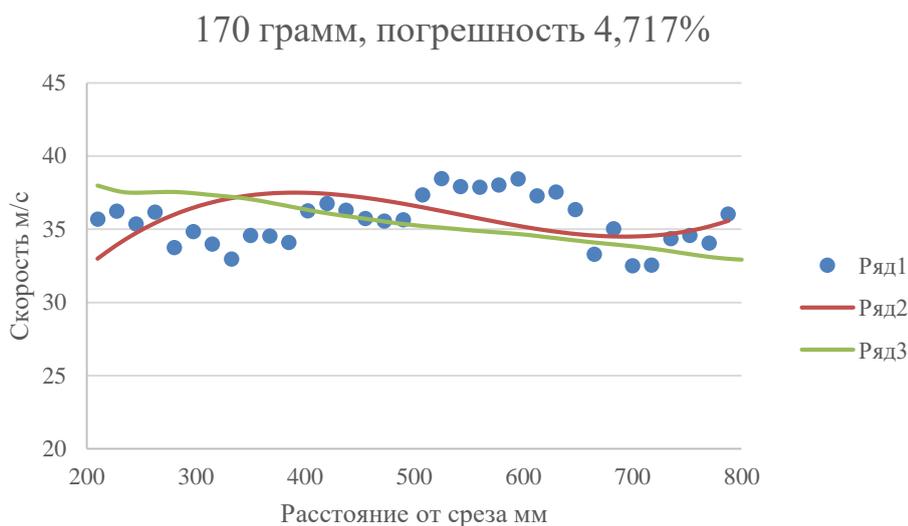


Рисунок 57. Экспериментальная и расчетная скорость двухфазного потока при расходе рабочей жидкости 205 г/с.



*Рисунок 58. Экспериментальная и расчетная скорость двухфазного потока при расходе рабочей жидкости 170 г/с.*

Дополнительные способы повышения точности расчетов относительно экспериментов заключаются в расчете негомогенной смеси, но это увеличит время расчета и потребует дополнительных входных данных, таких как распределение размеров капель жидкости на входе в камеру смешения ЖГСА. Значение изотермического КПД малоразмерного ЖГСА составило 9%.

### **3.5. Рекомендации по проектированию жидкостно-газовых двухфазных эжекторов.**

Так как анализ литературных источников показал, что представленные в них модели являются эмпирическими, то при проектировании ЖГСА в пределах режимов, изложенных в источниках, существует возможность опираться на геометрические данные. При использовании пилоновидной конструкции струйной форсунки, представленной в данной работе, с геометриями рабочих частей (камера смешения, корпус ЖГСА) из обзора возможно существенное улучшение характеристик.

На основании анализа расчетных и экспериментальных данных можно сделать заключение о том, что расчетная методика обеспечивает

хорошее прогнозирование параметров рабочего процесса в двухфазном ЖГСА, работающего на воде и воздухе, и может быть использована на ранних этапах проектирования ЖГСА для стендов высотных испытаний ракетных и авиационных двигателей и их агрегатов.

1. В случае, если конструкция форсунки ЖГСА обладает свойствами осевой симметрии, численное моделирование внутренних процессов может проводиться в секторной расчетной области. Этот метод предварительного расчета позволяет получить интегральные характеристики ЖГСА с минимальными затратами времени и вычислительных мощностей.

2. Для более точного определения удельных параметров ЖГСА рекомендуется использование полноразмерной расчетной области, которая включает в себя гидравлическую часть струйного смесительного элемента и расчетную сетку с большим количеством ячеек в пристеночных областях, где возможны зоны обратных токов и потерь скорости рабочего тела.

3. Для численного моделирования ЖГСА достаточной является сетка с  $Y_+ \geq 30$ . Если внутренняя геометрия позволяет сохранить качество расчетной сетки при уменьшении значения  $Y_+$ , то рекомендуется использовать сетку с меньшим значением  $Y_+$ . Не стоит забывать что уменьшение количества элементов сетки способствует ускорению процесса её построения.

4. Для описания турбулентности рекомендуется модель SST.

### **3.6. Практическое применение полученных результатов**

На практике результаты, изложенные в данной работе, применимы для:

- уменьшения энергозатратности при создании высотных условий для испытаний ракетных и авиационных двигателей (за счет повышения эффективности ЖГСА),
- упрощения стендового комплекса для высотных испытаний

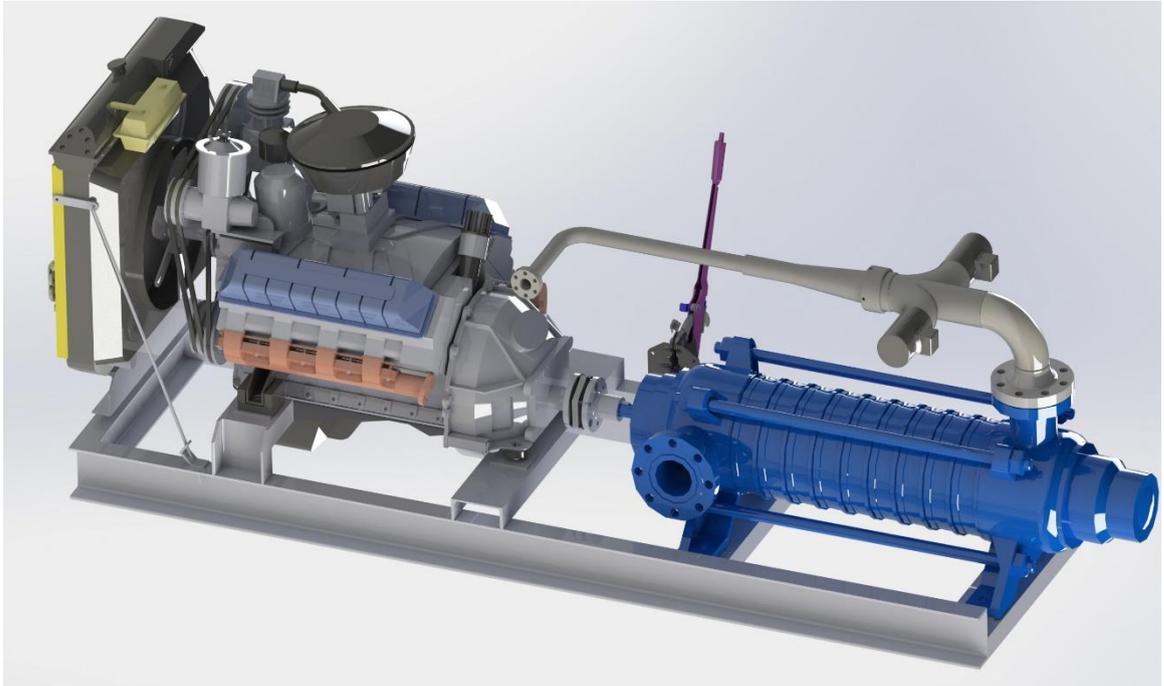
авиационных и ракетных двигателей,

- уменьшения габаритных размеров стендового комплекса для высотных испытаний авиационных и ракетных двигателей,
- повышения эффективности проведения испытаний насосных агрегатов,
- смесеобразования в камерах сгорания воздушно-реактивных и жидкостных ракетных двигателей,
- снижения вредных выбросов продуктов сгорания РД в атмосферу при испытаниях.

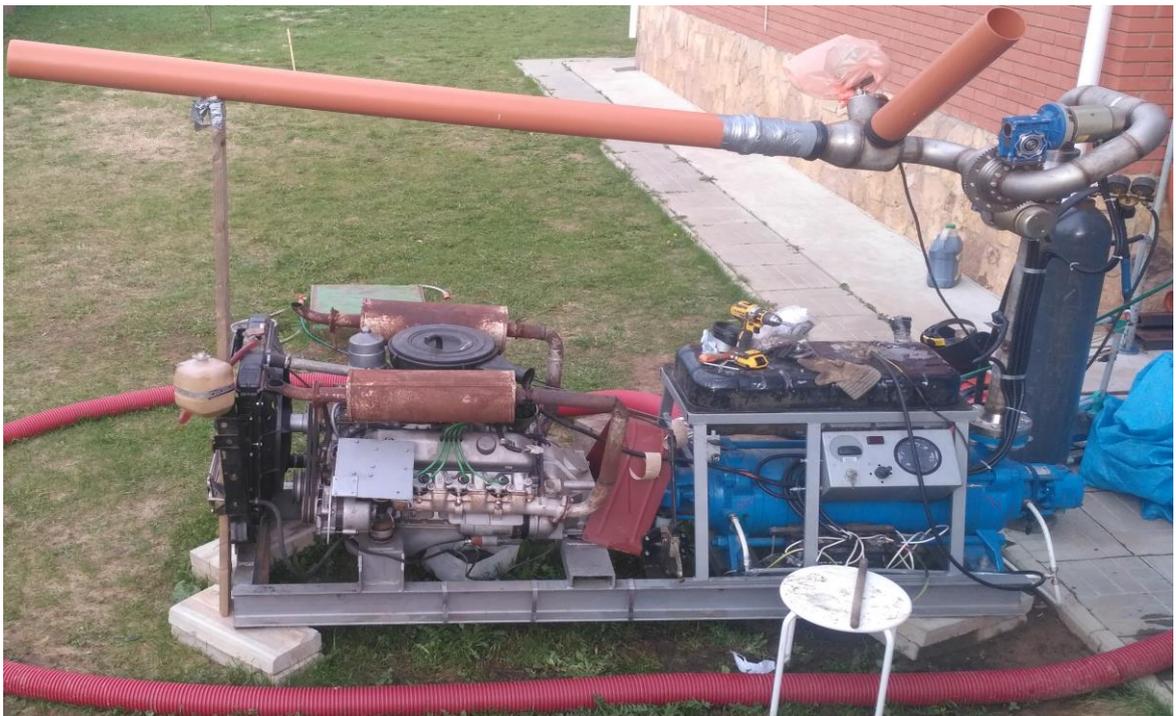
Общепромышленное применение:

- теплоэлектроэнергетика (снижение энергозатрат в конденсационных установках)
- деревообрабатывающая промышленность
- целлюлозно-бумажное производство
- нефтегазовая промышленность
- химическая промышленность
- пожаротушение
- сельское хозяйство

В настоящее время собрана и испытана увеличенная установка двухфазного жидкостно-газового эжектора (Рисунок 59, Рисунок 60) для уточнения влияния масштабных факторов на улучшение параметров работы ЖГСА и методик расчета.



*Рисунок 59. 3D модель эжекторной установки с расходом рабочего тела 20кг/с*



*Рисунок 60. Сборка эжекторной установки с расходом рабочего тела 20кг/с*

Расчетный расход эжектируемого воздуха для данной установки 570 г/с.  
Предельное абсолютное давление 0,02 абсолютных атмосферы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ моделей расчета, изложенный в обозреваемых работах, показал одномерный характер описания процессов, протекающих в СА, не отражающий современного подхода к численному моделированию двухфазных газо-жидкостных и жидкостно-газовых течений.

Выявлена необходимость комплексного численного моделирования процессов в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе.

2. Исследование различных конструкций смесительных элементов двухфазного жидкостно-газового эжектора позволило предложить для применения в СА острокрюмочный щелевой тип форсунок, который позволяет существенно улучшить смешение.

3. Проведено численное моделирование жидкостно-газового эжектора с двухфазным рабочим телом с использованием пакетов прикладных программ гидрогазодинамики ANSYS.

4. Экспериментальное исследование показало адекватность предложенной методики расчета, что позволило:

- Предложить использование SST модели турбулентности для расчета рабочего процесса в двухфазных жидкостно-газовых эжекторах.
- Сократить время экспериментальных исследований, а некоторых случаях просто ограничиться численным моделированием.
- Выдать рекомендации к проектированию двухфазных СА.

5. Проведенные исследования позволяют повысить эффективность работы малоразмерных двухфазных жидкостно-газовых эжекторов, выраженную отношением затраченной изотермической работы на сжатие газа от атмосферного давления до давления в откачиваемой емкости к гидравлической мощности, затраченной ЖГСА до 15%, а для крупноразмерных ЖГСА до 35%.

6. Результаты исследований позволяют путем применения численного моделирования при проектировании двухфазных СА снизить энергозатратность проведения испытаний ракетных и авиационных двигателей.

Автор считает своим долгом выразить благодарность: научному руководителю д.т.н. профессору Александру Александровичу Козлову, научному консультанту д.т.н. профессору Игорю Александровичу Лепешинскому, ведущему конструктору АО «ОКБ Кристалл» к.т.н. Евгению Андреевичу Истомину.

# СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

## Сокращения

ЖРД – жидкостный ракетный двигатель

РД – реактивный двигатель

ЭРД – электроракетный двигатель

СА – струйный аппарат

ЖГСА – жидкостно-газовый струйный аппарат

ГПВРД – гиперзвуковой прямоточный воздушно-реактивный двигатель

ГГСА – газ-газовый струйный аппарат

ЖРД МТ – жидкостной ракетный двигатель малых тяг

КПД – коэффициент полезного действия

PIV – Particle image velocimetry

CFX – Computational Fluid dynamiX

ЦТФ – центральное тело форсунки

ЦТЭ – центральное тело эжектора

ЧПУ – числовое программное управление

ДПУ – динамическое программное управление

ПЭВМ, ПК – персональная электронно-вычислительная машина

CCD – charge-coupled device

SST – Shear Stress Transport

## Обозначения

$\eta$  – коэффициент полезного действия

$L_{\text{полезн}}$  – полезная работа

$L_{\text{затр}}$  – затраченная работа

$\eta_{\text{ад}}^{\text{жг}}$  – адиабатический коэффициент полезного действия

$J$  – механический эквивалент тепла

$N_{\text{гидравлическая}}$  – гидравлическая мощность

$\eta_{\text{из}}^{\text{ж г}}$  – изотермический коэффициент полезного действия

$G_{\text{г}}$  – массовый расход газа

$G_{\text{ж}}$  – массовый расход жидкости

$P_{\text{ж0н}}$  – начальное полное давление жидкости

$P_{\text{с0}}$  – полное давление смеси

$\gamma_{\text{ж}}$  – удельный вес жидкости

$P^*$  – полное давление

$\varphi$  – скорость жидкости перед камерой смешения

$\Pi_1$  – отношение массового расхода жидкости к массовому расходу газа

$\varepsilon$  – отношение скорости жидкости к скорости газа

$\mathbf{U}$  – вектор скорости

$\Gamma$  – массовый расход фазы

$\mu$  – молекулярная (динамическая) вязкость

$u^+$  - безразмерная скорость

$y^+$  - безразмерное расстояние от стенки

$\sigma$  - турбулентные напряжения

$k$  - кинетическая энергия турбулентности,

$\varepsilon$  - скорость турбулентной диссипации,

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика [Книга]/ Москва : Наука, 1969. - 824 С.
2. Абрамович Г.Н., Крашенинников С.Ю., Секундов А.Н., Сминова И.П. Турбулентное смешение газовых струй [Книга]/ Под ред. Абрамовича Г.Н. М.: Наука, 1974, - 272 С.
3. Абкарян А.А., Алимов Р.З., Алимова А.К. Течение и массоперенос в гравитационном газожидкостном эжекторе [Статья] // Тепло- и массообмен в химической технологии. - Казань, 1981. - С. 14 - 16.
4. Авдеев А.А. Майданник В.Н., Шанин В.К., Методика расчета вскипающих адиабатных потоков [Статья] // Теплоэнергетика. - 1977 г.. - 8. - С. 67-69.
5. Авдеев А.А., Майданник В.Н., Селезнев Л.И., Шанин В.К. Расчет критического расхода при истечении насыщенной и недогретой воды через цилиндрические каналы [Статья]// Теплоэнергетика, 1977, №4, С. 36-38.
6. Акимов М.В. Цегельский В.Г. Ракетно-космические двигательные установки [Конференция] // Экспериментальные исследования жидкостно-газовых струйных аппаратов с двухфазным активным потоком. - Москва : [б.н.], 1998. - С. 47.
7. Аладьев И.Т. Анализ эффективности конденсационного инжектора [Статья] // Вопросы тепло и массопереноса в энергетических установках. - Москва : Тр. ЭНИИ, 1974 г.. - 19. - С. 45-61.
8. Аладьев И.Т. Кабаков В.И., Теплов С.В. Исследование инжекторов на двухфазных потоках воды и калия [Статья] // Исследования по механике и теплообмену двухфазных сред. - Москва : Тр. ЭНИИ, 1974 г.. - 25. - С. 171-180.
9. Акимов М.В., Цегельский В.Г. Экспериментальное исследование струйных аппаратов с двухфазным активным потоком. [Конференция]//Ракетокосмические двигательные установки Тезисы докладов российской конференции 1998г.. - С. 47
10. Анатолиев Ф.А. Теплообменные аппараты судовых паросиловых установок [Статья] // Судпромгиз. - Львов : [б.н.], 1963 г.. - С. 495.
11. Антонюк Н.И. Домалиев Е.Д. Исследование термоакустических автоколебаний в недогретых кипящих потоках [Статья] // Промышленная теплотехника. - 1993 г.. -

15. - С. 33-49.
12. Астахов И.В. Трусов В.И., Хачиян А.С. Подача и распыливание топлива в дизелях. / М : Машиностроение, 1971г. - 359 С.
13. Арбат В.С. Брылин В.И., Коваленко Н.Е. Исследование всасывающей способности водоструйных эжекторов [Статья] // Электрические станции. - 1980 г.. - 5. - С. 28-30.
14. Аронс Г.А. Струйные аппараты [Статья] // Госэнергоиздат. - Москва : [б.н.], 1948 г.. - С. 139.
15. Арсентьев В.В. Калайда Ю.А., Фисенко В.В., Цизин Б.М. Истечение теплоносителя при потере герметичности реакторного контура [Книга]. - Москва : Атомиздат, 1977.
16. Арсеньев В.М. Марченко В.Н., Прокопов М.Г., Проценко М.И. Применение струйной термокомпрессии в понижающих термотрансформаторах [Статья] // Холодильна техніка і технологія.. - 2009 г.. - 5. - С. 121.
17. Арсеньев В.М. Проценко М.И., Прокопов М.Г. Возможность применения струйно-парового эжектора в составе холодильной машины [Статья] // Промислова гідравліка і пневматика. - 2011 г.. - 2. - С. 10-14.
18. Арсеньев В.М. Шарапов С.О., Прокопов М.Г. Влияние масштабного фактора на эффективность жидкостно-парового струйного компрессора [Статья] // Компрессорное и энергетическое машиностроение. - 2011 г.. - 2. - С. 45-48.
19. Арсеньев В.М. Шарапов С.О., Прокопов М.Г. Исследование рабочего процесса жидкостно-парового эжектора, работающего в режиме вакуумирования [Статья] // Промислова гідравліка і пневматика. - 2011 г.. - 1. - С. 56-59.
20. Баженов М.И. Исследование работы двухфазных струйных аппаратов [Статья] // Электрические станции. - 1967 г.. - 4. - С. 39-41.
21. Баженов М.И. Экспериментальное исследование водовоздушного струйного аппарата на прозрачной модели [Статья] // Изв. вузов. Энергетика.. - 1966 г.. - 3. - С. 82-86.
22. Байдаков В.Г. Каверин А.М. Кинетика гомогенного и гетерогенного зародышеобразования в перегретом жидком азоте. [Статья] // ТВТ. - 1990 г.. - 1. - С. 90-96.

23. Басаргин Б. Н. Звездин Ю.Г., Соболев В.Г. Математическое описание процесса совместного переноса тепла и массы в дисперсных системах [Статья] // Массообменные и теплообменные процессы химической технологии. - 1975 г.. - С. 3-6.
24. Басаргин Б.Н. Катетов В.И., Власов В. В. Расчет тепло- и массообмена в скруббере вентури с центральным форсуночным орошением. [Статья] // Изв. вузов. Химия и химическая технология.. - 1981 г.. - 8 : Т. 24. - С. 1040-1043.
25. Берман Л. Д. Ефимочкин Г.И. Особенности рабочего процесса и режимы работы водоструйного эжектора [Статья] // Теплоэнергетика. - 1964 г.. - 2. - С. 31-35.
26. Берман Л.Д. Ефимочкин Г.И. Влияние длины камеры смешения на режимы работы и экономичность водоструйного воздушного эжектора [Статья] // Теплоэнергетика. - 1978 г.. - 12. - С. 66-71.
27. Берман Л.Д. Ефимочкин Г.И. Расчетные зависимости для водоструйных эжекторов [Статья] // Теплоэнергетика. - 1964 г.. - 7. - С. 44-48.
28. Берман Л.Д. Ефимочкин Г.И. Характеристика и расчет низконапорных водоструйных эжекторов [Статья] // Теплоэнергетика. - 1966 г.. - 10. - С. 89 - 90.
29. Берман Л.Д. Ефимочкин Г.И. Экспериментальное исследование водоструйного эжектора [Статья] // Теплоэнергетика. - 1963 г.. - 9. - С. 9-15.
30. Фисенко В.В. Критический расход двухфазной смеси при нарушении первого контура ЯЭУ. /- Атомная техника за рубежом, 1975, №7, с. 25.
31. Бондаренко А.Д. Аэродинамические характеристики водовоздушного эжектора ЭВЦ 265 [Статья] // Безопасность труда в промышленности. - 1976 г.. - 10. - С. 38-39.
32. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа [Книга]. - Москва : Энергия, 1973. - С. 296.
33. Бэр Г.Д. Техническая термодинамика [Книга]. - Москва : Мир, 1977. - С. 518.
34. Вайнштейн С.И. Гандельсман А.Ф., Севастьянов А.П. Исследование методов пуска конденсационного инжектора [Статья] // МГД-метод получения электроэнергии. - Москва : Энергия, 1972 г.. - С. 220 - 237.
35. Вайнштейн С.И. Гандельсман А.Ф., Севастьянов Л.П. К вопросу об оптимизации условий работы двухфазного диффузора с конденсирующимся потоком [Статья] //

- Теплофизика высоких температур. - 1975 г.. - 2. - С. 416-422.
36. Вайнштейн С.И. Гандельсман А.Ф., Севастьянов Л.П. К вопросу об оценке потерь в неидеальном конденсационном инжекторе [Статья] // Теплофизика высоких температур. - 1974 : [б.н.]. - 1. - С. 184-190.
37. Вайсман М.Д. Термодинамика парожидкостных потоков [Книга]. - Львов : Энергия, 1967. - С. 173.
38. Васильев Ю. Н. Некоторые одномерные задачи течения двухфазной газопарожидкостной смеси [Статья] // Машиностроение. Лопаточные машины и струйные аппараты. - 1972 г.. - 6. - С. 179-201.
39. Васильев Ю.Н. Гладков Е. П. Экспериментальное исследование вакуумного водовоздушного эжектора с многоствольным соплом [Статья] // Машиностроение. Лопаточные машины и струйные аппараты. - 1971 г.. - 5. - С. 262-306.
40. Васильев Ю.Н. Теория двухфазного газожидкостного эжектора с цилиндрической камерой смешения [Статья] // Машиностроение. Лопаточные машины и струйные аппараты. - 1971 г.. - 5. - С. 175-261.
41. Васильев Ю.Н., Климовский К.К. Исследование суживающихся сопел на пароводяной смеси [Статья] // Машиностроение. Лопаточные машины и струйные аппараты. - 1971 г.. - 5. - С. 48-62
42. Вайнштейн С.И., Гандельсман А.Ф., Рябцев В.А. Развитие метода «сброса массы» для запуска конденсационного инжектора и исследование внешних характеристик аппарата [Статья] // Теплофизика высоких температур. - 1973. - Т. 11, № 6. - С. 1264 - 1271.
43. Гандельсман А. Ф. Вайнштейн С.И., Морозов А.Е. Выбор оптимальных размеров горла диффузора конденсирующего инжектора [Статья] // Теплофизика высоких температур. - 1976 г.. - 2. - С. 365- 371.
44. Гандельсман А.Ф. Вайнштейн С.И., Севастьянов А.П. Анализ эффективности работы однокомпонентного конденсационного инжектора с малым размером горла диффузора [Статья] // Теплоэнергетика. - 1976 г.. - 5. - С. 62-70.
45. Гладков Е.Л. Усанов В.В. Расчетно-теоретическое исследование криогенного инжектора с цилиндрической камерой смешения [Статья] // Современные проблемы гидродинамики и теплообмена в элементах ЭУ и криогенной технике. - 1985 г.. - С.

78 - 84.

46. Гролме М.А. Петрик М. Экспериментальное исследование работы конденсационного инжектора и анализ КПД при сверхзвуковых скоростях пара на входе [Статья] // Информ. бюллетень / ВИНТИ. - 1969 г.. - 7. - С. 15.
47. Гурченко А. А. [Статья] // Изв. вузов / Энергетика.
48. Гурченко А. А. «Изв. Томск, политехн, ин-та» [Статья].
49. Гуцин Ю.И. Галицкий И.В., Басаргин Б.Н. Коэффициент полезного действия струйного аппарата [Статья] // Массообменные и теплообменные процессы химической технологии. - 1975 г.. - С. 20 - 25.
50. Данилин В. С. [Статья] // Труды Московского энергетического ин-та.
51. Дворниченко В. В. [Статья].
52. Дейч М.Е. Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред [Книга]. - Москва : Энергия, 1968.
53. Дейч М.Е. Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред [Книга]. - Москва : Энергоиздат, 1981. - С. 471.
54. Дейч М.Е. Робожев А.В., Кох А.А. Влияние некоторых геометрических и газодинамических параметров ступени эжектора с изобарическим начальным участком смешения на эффективность ее работы [Статья] // Труды МЭИ. - 1955 г.. - 23. - С. 103 - 120.
55. Дейч М.Е., Марков Е.И., Севастьянов А.П. Экспериментальное исследование модели инжектора как разгонного устройства для МГД-установок [Статья]// Магнитогидродинамический метод получения электроэнергии - М.: Энергия, 1968. С. 433-444.
56. Дейч М.Е., Степанчук В.Ф., Циклаури Г.В. Методика расчета простейшего инжектора [Статья]// Магнитогидродинамический метод получения электроэнергии. - М.: Энергия. 1968. - С. 456 - 467.
57. Демьянова Л. А. Аналитический расчет характеристик струйного аппарата при откачке газожидкостных смесей [Статья] // НТЖ. Нефтепромысловое дело. - 1999 г.. - 5. - С. 39 - 44.
58. Демьянова Л.А. Исследование работы струйного аппарата для различных конфигураций его проточной части при эжектировании струей жидкости

- газожидкостной смеси [Статья] // НТЖ. Нефтепромысловое. дело. - 1999 г.. - 1. - С. 16-22.
59. Денисов Ю.К. Тачанов Н.И. Исследование водовоздушного центробежного эжектора [Статья] // Изв. вузов. Химия и химическая технология. - 1967 г.. - 6. - С. 703-709.
60. Дин Р. В. Образование пузырей [Статья] // Вопросы физики кипения. - 1964 г.. - С. 13-27.
61. Донец К.Г. Влияние газонасыщенности рабочей жидкости на производительность жндкостно-струйного компрессора [Статья] // Деп. в УкрНИИНТИ 18.09.Х9, РГАСНТИ. - 1989 г.. - С. 18.
62. Донец К.Г. Рошак И.И. Еремина Л.Н. Применение насосного эжектора для перекачки нефтяного газа [Статья] // Нефтепромысловое дело. - 1978 г.. - 5. - С. 58-60.
- 63.Дорофеев А.А Расчет динамического коэффициента связи жидкости в выходном сечении камеры смешения [Статья] // Изв. вузов. Машиностроение. - 1978 г.. - 11. - С. 82-85.
- 64.Ефимочкин Г.И. Влияние конструкции сопла на работу водоструйного эжектора [Статья] // Электрические станции. - 1964 г.. - 5. - С. 7-11.
- 65.Ефимочкин Г.И. Исследование и выбор водоструйных эжекторов с удлиненной цилиндрической камерой смешения [Статья] // Электрические станции. - 1976 г.. - 4. - С. 46-49.
- 66.Ефимочкин Г.И. Конструкция и расчет водоструйных эжекторов с удлиненной камерой смешения [Статья] // Теплоэнергетика. - 1982 г.. - 12. - С. 48-51.
- 67.Ефимочкин Г.И. Кореннов Б.Е. Методика расчета водовоздушного эжектора с удлиненной цилиндрической камерой смешения [Статья] // Теплоэнергетика. - 1976 г.. - 1. - С. 84-86.
- 68.Ефимочкин Г.И. Результаты испытаний низконапорного водоструйного эжектора [Статья] // Электрические станции. - 1967 г.. - 3. - С. 39-43.
- 69.Ефимочкин Г.И. Сравнительные испытания пароструйных и водоструйных эжекторов на турбине Т-250/300-240 ТМЗ [Статья] // Электрические станции. - 1982 г.. - 8. - С. 20 - 23.

70. Жердев В.М. Цегельский В.Г., Чернухин В.А. К расчету режимов «частичный распад» жидкостно-газового струйного аппарата [Статья] // Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Вопросы двигателестроения. - 1982 г.. - 7. - С. 100-111.
71. Жуков Д.А. Кузнецов В.И., Левин А.А. Некоторые результаты экспериментального исследования влияния геометрии камеры смешения инжектора на потери в ней [Статья] // Теплофизика высоких температур. - 1975 г.. - 1. - С. 166-170.
72. Заранкевич И.А., Антоновский И.В. Экспериментальное исследование газодинамического смесительного устройства закрытого типа / [Тезисы конференции] // Гагаринские чтения - 2016: XLII Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов; В 4 т. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. С. 688 - 689.
73. Зауэр Р. Нестационарные задачи газодинамики [Книга]/ Москва : Мир, 1969.
74. Захариков Г.М. Основы теории водоструйных аппаратов для сжатия воздуха [Статья] // Ин-т горного дела. - 1965 г.. - С. 156.
75. Звездин Ю.Г. Симаков И.И., Пластинин А.И. Гидродинамика и теплообмен при распыливании жидкости в потоке высокотемпературного газа [Статья] // Теоретические основы химической технологии. - 1986 г.. - 3. - С. 354-359.
76. Зингер Н.М. Исследование водовоздушного эжектора [Статья] // Теплоэнергетика. - 1958 г.. - 8. - С. 26-31.
77. Зысин В.А. Баранов Г.А., Барилевич Б.А., Парфенов Т.Н. Вскипающие адиабатные потоки [Статья] // Атомиздат. - 1976 г.. - С. 152.
78. Иродов В.Ф. Аладьев И.Т. К расчету параметров двухфазной смеси в камере смешения инжектора-конденсатора [Статья] // Теплотехнические проблемы прямого преобразования энергии. - 1975 г.. - 6. - С. 96-98.
79. Иродов В.Ф. Аладьев И.Т. К расчету течения в инжекторе-конденсаторе [Статья] // Исследования по механике и теплообмену двухфазных сред. - [б.м.] : Тр. ЭНИН, 1974 г.. - С. 156 - 160.
80. Иродов В.Ф. К вопросу об описании поля течения в камере смешения инжектора [Статья] // Инженерно-физический журнал. - 1976 : [б.н.]. - 5. - С. 788 - 793.

- 81.Иродов В.Ф. Теплов С.В. О течении в камере смешения инжектора-конденсатора [Статья] // Теплофизика высоких температур. - 1973 г.. - 5. - С. 1101-1106.
- 82.Исмагилов А.Р., Спиридонов Е.К. К вопросу энергоэффективности водовоздушного струйного насоса при использовании побудителя пассивного потока [Статья] // Вестник УГАТУ 2013 Т. 17, № 4 (57). С. 70-75
- 83.Кабаков В.И. Аладьев И.Т. Смешение и конденсация в скоростных двухфазных потоках в энергетических устройствах [Статья]// - Москва : ЭНИН, 1974 г..
- 84.Кабаков В.И. Исследование работы двухступенчатого инжектора-конденсатора [Статья] // Теплофизика высоких температур. - 1974 г.. - 3. - С. 626-631.
- 85.Казанский А.М. Конденсационные устройства [Статья]. - 1939 г.. - ГОНТИ.
- 86.Кабаков В.И. Исследование работы двухступенчатого инжектора-конденсатора. [Статья]// Теплофизика высоких температур. - 1974. - Т. 12, №3.- С. 626-631.
- 87.Казанский А.М. Конденсационные устройства [Книга] /М.: ГОНТИ, 1939. - 306 С.
- 88.Калинин Ю. Ф. [Кандидатская диссертация] / Николаев. Николаевский кораблестроительный ин-т, 1971.
- 89.Канингэм Р.Ж. Сжатие газа с помощью жидкоструйного насоса [Статья]// Тр. Американского общества инженеров-механиков. Сер. Д. Теоретические основы инженерных расчетов. - 1974. - № 3. - С. 112-118.
- 90.Канингэм Р.Ж., Допкин Р.И. Длины участка разрушения струи и смешивающей горловины жидкоструйного насоса для перекачки газа. [Статья]// Тр. Американского общества инженеров-механиков. Сер. Д. Теоретические основы инженерных расчетов. - 1974. - №3. - С. 128-141.
- 91.Кассандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов измерений [Статья]// М.: Наука, 1970. - 104 С.
- 92.Каула Р.Д., Робинсон КВ., Яновский М.О., Каула Р.Д., Конденсационные установки. [Книга] / Каула Р.Д., - Л.: ГТИ, 1930. - 284 С.
- 93.Келлер С.Ю. Инжекторы. [Книга] / М.: Машгиз, 1954. - 96 С.
- 94.Кирсанов И. Н. Конденсационные установки. [Книга] / -М.: Энергия, 1965. - 375 С.
- 95.Копьев С.Ф. Вспомогательное оборудование машинных цехов электростанций [Книга] / М.; Л.: Госэнергоиздат, 1954. - 296 С.

96. Кореннов Б.Е. Рабочий процесс в газожидкостном эжекторе [Статья]// Теплоэнергетика. - 1977. - №1. - С. 59-65.
97. Кудрявцев Б.К., Хураев Л.В. Экспериментальные исследования парожидкостного инжектора в замкнутом контуре. [Статья]// Исследование по тепломассообмену: Тр. ЭНИИ; Вып. 53. - М, 1976. С. 70 - 85.
98. Лепешинский И. А., Решетников В. А., Истомин Е. А., Заранкевич И.А., Смесительное устройство пузырьковой структуры открытого типа [Статья] // Известия вузов. Авиационная техника. - 2016. - № 3. С. 71 - 75.
99. Лепешинский И.А., Решетников В.А., Заранкевич И. А., Истомин Е.А., Антоновский И.В., Гузенко А.А. Экспериментальное исследование газодинамического смесителя закрытого типа [Статья] // Вестник Самарского университета Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение 2016, С. 70 - 80.
100. Лепешинский И.А., Зуев Ю.В., Решетников В.А., Антоновский И.В., Гузенко А.А., Заранкевич И.А. Эжектор с двухфазным рабочим телом и газодинамическим смесителем [Тезисы конференции] // Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016), 25-31 мая 2016 г., Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2016. С. 91 - 93.
101. Лепешинский И. А, Решетников В. А, Антоновский И. В, Гузенко А. А, Зуев Ю. В, Заранкевич И. А. Смеситель с двухфазным рабочим телом [Тезисы конференции] // Материалы XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016), 25-31 мая 2016 г., Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2016. С. 93 - 95..
102. Лепешинский И.А., Решетников В.А., Заранкевич И.А., Истомин Е.А., Антоновский И.В., Гузенко А.А. Газодинамический смеситель закрытого типа и результаты его экспериментальных исследований [Тезисы конференции] // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения»: Сборник тезисов докладов, 2016. - С. 137 - 138.
103. Лепешинский И.А, Заранкевич И.А., Казеннов И.С., Численное и экспериментальное моделирование двухфазного жидкостно-газового эжектора [Тезисы конференции] // Материалы XX Международной конференции по

- неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2017), 24-31 мая 2017 г., Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2017. - С. 492 - 494.
104. Лепешинский И.А., Решетников В.А., Заранкевич И.А., Истомин Е.А., Антоновский И.В., Гузенко А.А., Сравнительный анализ двух газодинамических схем формирования двухфазных газочапельных струй [Тезисы конференции] // Материалы XX Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2017), 24-31 мая 2017 г., Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2017. - С. 497 - 498.
105. Лепешинский И.А., Решетников В.А., Заранкевич И. А., Численное моделирование и экспериментальное исследование жидкостно-газового двухфазного эжектора со сверхзвуковым профилированным соплом [Статья] // Вестник Самарского университета Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение 2017,
106. Радковский И.С. Скорость звука в двухфазных парожидкостных смесях. [Статья] // Журнал прикладной механики и технической физики. - 1970. - №5. - С. 78.
107. Раушенбак Б.В., Белый С.А., Физические основы рабочего процесса камер сгорания воздушно-реактивных двигателей [Книга] / М.: - Главполиграфпром, 1964. - 522 С.
108. Радциг А.А. Теория и расчет конденсационных установок. [Книга] / М: Энергоиздат, 1934. - 218 С.
109. Ривкин С.А. Термодинамические свойства воды и водяного пара. [Книга] / М. - Энергия, 1975. - 80 С.
110. Румянцев В.А. Определение основных размеров водокольцевых компрессоров и вакуум-насосов [Статья] // Химическое машиностроение, 1962. - № 1. - С. 25-31.
111. Салтанов Г.А., Циклаури Г.В., Шанин В.К. Ударные волны в потоке влажного пара с высокой концентрацией жидкой фазы. [Статья] // Тепло физика высоких температур. - 1970. - Т. 9, № 3. - С. 571 - 579.
112. Севастьянов А.П., Ан И.В., Соловьев А.А. Результаты исследования инжектора, работающего на паровоздушной смеси [Статья] // Теплофизика ядерных энергетических установок: Тр. УПИ; Вып. 2. - Свердловск, 1983. - С. 1-10.
113. Симонов Ю.М., Воронина Е.П., Маркин А.А. Исследование и расчет приборов с

- водо-воздушными эжекторами для подпитки воздухом воздушно-гидравлических колпаков на насосных станциях железнодорожного водоснабжения. [Статья] // Тр. Ленинград. ин-та инж. ж.-д. транс-та.- 1973. - Вып. 358. - С. 3-16.
- 114.Смирнов В.И. Бахтюков В.Н., Горст А.Г. О влиянии степени дисперсности в струйных аппаратах на удельную производительность гетерогенной реакции[Статья] // Изв. вузов. Химия и химическая технология. -1967. - т. 10, №7. - С. 830-832.
- 115.Соколов Е.Я. Зингер Н.М. Струйные аппараты. [Книга] / М.: Энергоиздат, 1989. - 352 С.
- 116.Спиридонов Е.К., Темное В.К. Исследование экстремальных характеристик водовоздушного эжектора. [Статья] // Динамика пневмогидравлических систем: Тематический сб. научи, тр. - Челябинск: ЧПИ, 1983. - С. 62-75.
- 117.Стырикович М.А. Полонский В.С., Циклаури Г.В. Теплообмен и гидродинамика в двухфазных потоках атомных электрических станций. [Книга] // - М.: Наука, 1982. - 368 С.
- 118.Сальников В.С., Басаргин Б.Н., Зевакина Т.К. Теплообмен в струйном аппарате при сверхзвуковых скоростях истечения газа [Статья] // Ярославский политех. ин-т. - Ярославль, 1981. - 11 С. - Деп. ЦИНТИХИМ.
- 119.Тихоненко Л.К., Кеворков Л.Р., Лутовинов С.З. Исследование локальных параметров критического потока горячей воды в прямых трубах с острой входной кромкой. [Статья]// Теплоэнергетика, №2, 1978, С. 41-44.
- 120.Тонконог В.Г., Термическая неравновесность процесса истечения вскипающих жидкостей. [Тезисы конференции] // Труды второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.5. Двухфазные течения. Дисперсные потоки и пористые среды. М.: Изд. МЭИ, 1998. С. 121-124.
- 121.Тонконог В.Г., Гортышов Ю.Ф. Фазовые переходы в потоке жидкости. [Статья] // Труды Казанского гос. техн. университета им. А.Н. Туполева. - 2004.
- 122.Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. [Книга] / Уоллис Г. Пер. с англ. М., «Мир», 1972. - 436 С.
- 123.Успенский В.А., Кузнецов Ю.М. Струйные вакуумные насосы. [Книга] / М: Машиностроение, 1973. - 144 С.

- 124.Фисенко В.В. Критические двухфазные потоки. [Книга] / М.: Атомиздат, 1978. - 158 С.
- 125.Фисенко В.В., Скакунов Ю.П. О механизме скачка давления в камере смешения струйного аппарата [Статья] // Теплоэнергетика. - 1982. - №10 - С. 48-50.
- 126.Хлесткин Д.А., Коршунов А.С., Канищев В.П. Определение расходов воды высоких параметров при истечении в атмосферу через цилиндрические каналы. [Статья] // Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт, 1978, №5, с. 126-135.
- 127.Хураев Л.В., Воронцов Н.Д, Аладьев И.Т. Приближенная теория за пуска инжектора.[Статья] // Исследования по механике и теплообмену двух фазных сред: Тр. ЭНИН, Вып 25.-М., 1974.-С. 161 - 170.
- 128.Цегельский В.Г. К теории двухфазного струйного аппарата. [Статья]// Изв. вузов. Машиностроение. - 1977. - № 6. - С. 79 - 85.
- 129.Цегельский В.Г. Применение теорем термодинамики необратимых процессов в определении режима работы двухфазного струйного аппарата. [Статья]// Изв. вузов. Машиностроение - 1976. -№ 5. -С. 98 - 103.
- 130.Цегельский В.Г. Определение режимов работы жидкостно-газового струйного аппарата. [Статья]// Изв. вузов. Машиностроение. - 1977. - № 5. - С. 60 65.
- 131.Цегельский В.Г. О зависимости для динамического коэффициента связи в выходном сечении жидкостно-газового с трупного аппарата.[Статья]// Изв. вузов. Машиностроение. - 1984. -№ 1. -С. 47 - 51.
- 132.Цегельский В.Г. К расчету характеристик жидкостно-газового струйного аппарата. [Статья]// Изв. вузов. Машиностроение. -1984. - № 3. - С. 63-68.
- 133.Цегельский В.Г. К расчету оптимальной длины камеры смешения жндкостно-газового струйного аппарата. [Статья]// Изв.вузов. Машиностроение. - 1988. - № 7. - С.61 - 67.
- 134.Цегельский В.Г. Выбор оптимальной длины камеры смешения жидкостно-газового струйного аппарата. [Статья]// Изв. вузов. Машиностроение. - 1988.-№9.- С. 69-73.
- 135.Цегельский В.Г., Чернухин В.А., Глубоковский С.И. Расчет жидкостно-газового струйного аппарата с конической камерой смешения. [Статья] // Изв. вузов. Машиностроение. - 1979. №3. - С. 58 -63.

136. Циклаури Г.В., Данилин В.С., Селезнев Л.И. Адиабатные двухфазные течения. [Книга] / М: Атомиздат, 1973. - 447 С.
137. Циклаури Г.В., Кудрявцев Б.К., Ворохоб Б.А. Экспериментальное исследование скачка уплотнения в диффузоре парожидкостного инжектора. [Статья] // Теплофизика высоких температур. - 1976. - Т. 14, № 4. - С. 881 - 886.
138. Ципенко А.В. Исследование турбулентных характеристик двухфазных струйных течений [Кандидатская Диссертация] 1996 С. 61-119
139. Чернухин В.А., Цегельский В.Г., Глубоковский С.И. Анализ работы жидкостно-газового струйного аппарата с конической камерой смешения. [Статья]// Вопросы двигателестроения: Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана; №313. - М, 1979.-Вып. 2. - С. 49-58.
140. Чернухин В.А., Цегельский В.Г., Глубоковский С.И. О расчете жидкостно-газовых струйных аппаратов. / [Статья]// Изв. вузов. Машиностроение. - 1977. -№ 8. - С. 81 - 86.
141. Чернухин В.А., Цегельский В.Г., Глубоковский С.И. Определение динамического коэффициента связи в выходном сечении камеры смешения жидкостно-газового струйного аппарата. [Статья]// Изв. вузов. Машиностроение. - 1977. - № 9. - С. 69 - 74.
142. Чернухин В.А., Цегельский В.Г., Глубоковский С.И. Влияние геометрических параметров жидкостно-газового струйного аппарата на динамический коэффициент связи. [Статья]// Изв. вузов. Машиностроение. - 1977. - №10. - С. 82-86.
143. Чернухин В.А., Цегельский В.Г., Дорофеев А.А. Экспериментальное исследование жидкостно-газовых струйных аппаратов. [Статья]// Изв. вузов. Машиностроение. - 1980. - № 3. - С. 48 - 52.
144. Чернухин В.А., Цегельский В.Г., Дорофеев А.А. О режимах работы жидкостно-газового струйного аппарата. [Статья]// Вопросы двигателестроения: Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана; № 290. - М., 1979. - С. 35 - 46.
145. Чернухин В.А., Цегельский В.Г., Глубоковский С.И. Исследование жидкостно-парогазовых струйных аппаратов [Статья] // Изв. Вузов Машиностроение. - 1977 г.. - 11. - С. 88-91.
146. Чернухин В.А., Цегельский В.Г., Глубоковский С.И. Экспериментальное

- исследование режимов работы жидкостно-газового струйного аппарата [Статья]// МВТУ им. Н.Э. Баумана. - М., 1976.- 16 С. - Деп. вВИНИТИ 2.04.76, № 1014-76.
- 147.Шпильрайн Э.Э. Ан И.В., Вайнштейн С.И. Исследование поведения скачка уплотнения в процессе пуска конденсационного инжектора [Статья] // Вопросы газотермодинамики энергоустановок. - [б.м.] : Тр. ХАИ, 1977 г.. - С. 88-98.
- 148.Шапиро Я.Г. Экспериментальное исследование жидкостного эжектора. [Статья] // Присоединение дополнительной массы в струйных аппаратах: Тр. МАИ; Вып. 97. - М. : Оборонгиз, 1958. - С. 191
- 149.Шенк Х. Теория инженерного эксперимента. [Книга] / Шенк Х. Пер. с англ. Е.Г. Коваленко. / М.: Мир, 1972. - 381 С.
- 150.Шидловский В.П. К расчету газожидкостного эжектора. [Статья] // Изв. АН СССР. ОТН. - 1954. - С. 119 - 123.
151. Шишов А.А., Силин Б.М. Высотные испытания реактивных двигателей [Статья] // Машиностроение 1985 С. 207.
- 152.Шпильрайн Э.Э. Некоторые результаты исследования пульсаций давления в конденсационном инжекторе [Статья]// Теплоэнергетика. - 1976.-№12.-С.7-10.
- 153.Шмидт Л.И., Консетов В.В., Проскуряков В.А. Образование пузырей при дросселировании пересыщенных жидкостей. [Статья]// ИФЖ., 1971. Т.20, С. 261 - 267.
- 154.Шпитов А. Б, Спиридонов Е. К. О предельных режимах работы жидкостно-газового эжектора. [Статья]// Исследование силовых установок и шасси транспортных машин: Тематический сб. научн, тр. - Челябинск: ЧГТУ 1991 С. 129-134.
- 155.Benjamin M. W., Miller I. F. Trans. ASME, 1941, p. 63.
- 156.Brown G.A., Lee K.S Л Liquid Metal MHD Power Generation Cycle-Using a Condensing Ejector [Статья] // Proceedings of the International Symposium on Magnetohydrodynamic Electrical Power Generation. - Viena: International Atomic Energy Agency. - 1964. - V. 2. - P. 929-939.
157. Cunningham R. G. Liquid Jet Pumps for Two-Phase Flows Consjitant, Research Corporation Technologies, inc.,1995
- 158.DaGraz A. J. R. MS thesis. Univ. of Minnesota, 1953.

159. Ecabert R., 1965, Bd. 17, No. 1, S. 2088.
160. Fauske H. K. ANL - 6633, USA EC. Res. Development Report, T1D-4500, 18 - th Ed., Oct., 1962.
161. Frenzl O. Maschinenbau und Warmewirtschaft, 1956, No. 1, p. 11, und No. 2, p. 45.
162. Friedrich N., Fetter G. Energie, [Книга] / 1961, No. 5, p. 364.
163. Friedrich H., Fetter G. Energie, [Книга] / 1962, No. 1, p. 1144.
164. Giffen E., Muraszew A., The Atomisation of Liquid Fuels, London, 1953.
165. Klone K.G. Untersuchungen an Wasserstrahl - Luftpumpen [Статья] // Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure. - 1935. - Bd. 79, № 3. - С. 77 - 78.
166. Klockgether J., Schwefel H. P. [Статья] // Reprint of a Paper, Presented at the Symposium on MHD Electrical Power Generation, 1969.
167. Miad Yazdani, Abbas A. Alahyari, Thomas D. Radcliff. [Статья] // Numerical Modeling and Validation of Supersonic Two-Phase Flow of CO<sub>2</sub> in Converging-Diverging Nozzles.
168. Pfeleiderer C Zur Berechnung der Wasserstrahle - Luftpumpen [Статья] // Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure. - 1914. - Bd, 58, № 24. -S. 965-973.
169. Michal Palacz, Jacek Smolka, Wacław Kus. [Статья] // CFD-based shape optimisation of a CO<sub>2</sub> two-phase ejector mixing section 2016.
170. Sajad Alimohammadi, Tim Persoons, Darina B. Murray [Статья] // A Validated Numerical-Experimental Design Methodology for a Movable Supersonic Ejector Compressor for Waste-Heat Recovery 2013.
171. Sauvage M. E. Ann. Mines., [Книга] / 1892, Bd. II.
172. Stuart M., Jarnell R. Mech. Engng, [Книга] / 1936, No. 1.
173. Silver R., Mitchell J. Trans. North-East-Coast Inst. England Shipbuilders, [Книга] / 1945, p. 62.
174. Witte J.H Mixing Shocks in Two-Phase Flow [Статья] // Fluid Mechanica. -1969. - V.36, part 4.-P. 639-656.
175. Zeuner G. Technische Thermodynamik Bd. Die Lehre Von Den Dampfen, 1890.
176. Jun Zhang, Jing-ru Mao, Shun-sen Wang [Статья] // Experimental Study on the Cavitation Characteristics of an Oil Jet Pump With Multiple Nozzles for the Lubrication System in a Steam Turbine 2014.

177. ANSYS 17.1 Help, chepter 2.2.2.4.3, chepter 5.1-7.18 [Электронный источник]  
URL: <https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/17.0/en-us/help/> (дата обращения 20.02.2017)
178. Сайт Wikipedia, Aero-Acoustic Analyses and Experimental Validation [Электронный источник] URL: [https://icme.hpc.msstate.edu/mediawiki/index.php/Aero-Acoustic Analyses and Experimental Validation](https://icme.hpc.msstate.edu/mediawiki/index.php/Aero-Acoustic_Analyses_and_Experimental_Validation) (дата обращения 20.02.2017)
179. Сайт NASA Hypersonic and Space-Oriented Wind Tunnels at Ames [Электронный источник] URL: <https://www.hq.nasa.gov/pao/History/SP-440/ch6-15.htm> (дата обращения 20.02.2017)
180. Сайт Mitsubishi Heavy Industries, High-altitude Performance Test Facility [Электронный источник] URL: [https://www.mhi.com/products/expand/rocket\\_engine\\_combustion\\_test\\_facility\\_supply\\_result\\_03.html](https://www.mhi.com/products/expand/rocket_engine_combustion_test_facility_supply_result_03.html) (дата обращения 20.02.2017)
181. Сайт Penn Blocker [Электронный источник] URL: <http://www.personal.psu.edu/jbs5292/experience.html> (дата обращения 20.02.2017)
182. Сайт высотного испытательного комплекса Pyestoc [Электронный источник] URL: <http://www.ngte.co.uk/doc/doc/eactf6.htm> (дата обращения 20.02.2017)
183. Сайт фирмы Lavision [Электронный источник] URL: <http://lavision.de/en/> (дата обращения 20.02.2017)