

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"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

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

Официальные оппоненты: **Стасенко Альберт Леонидович,**
доктор технических наук, профессор,
Федеральное государственное унитарное
предприятие «Центральный
аэрогидродинамический институт имени
профессора Н.Е. Жуковского», главный научный
сотрудник.

Арефьев Константин Юрьевич,
кандидат технических наук, ФГУП "Центральный
институт авиационного моторостроения им. П.И.
Баранова", старший научный сотрудник отдела
аэрокосмических двигателей.

Ведущая организация: Федеральное казенное предприятие «Научно-
испытательный центр ракетно-космической
промышленности»

Защита состоится «26» декабря 2017г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

<https://mai.ru/upload/iblock/c11/jj02.10.2017.pdf>

Автореферат разослан: « _____ » _____ 2017г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д212.125.08
доктор технических наук, профессор



Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации.

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 испытания их работы проводятся только в вакууме. Для авиационных двигателей также проводятся высотные испытания. Помимо этого, разряжение применяется при проверке кавитационного запаса насосных агрегатов и баковых систем. Общая схема высотных испытаний заключается в следующем: объект помещается в замкнутый объем – вакуумная камера, в которой создается пониженное давление и производится 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. В большей части вакуумных насосов 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 разряжения 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 также происходит снижение вредных выбросов, эжектор 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 NH_3 , NaOH , NaCO_3 , MnO_4 , этаноламинов или твердых сорбентов.

В общем виде эжектор представляет из себя струйный аппарат, ресурс которого представляет из себя время 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 профилированным сверхзвуковым соплом с использованием пакетов прикладных программ гидрогазодинамики, рассмотрено применение жидкостно-газовых двухфазных эжекторов для создания разряжения 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 расхода жидкости к массовому расходу эжектируемого газа. 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, исследование повышения эффективности двухфазных струйных аппаратов является актуально научно-технической задачей для авиационно-космической отрасли. Это прежде всего, связано с отсутствием современной инженерной методики численного моделирования процессов формирования рабочего тела в двухфазных жидкостно-газовых струйных аппаратах. Кроме того, в настоящее время используются методики расчета, основывающиеся на экспериментальных коэффициентах, при этом 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 сверхзвуковым соплом и регулируемыми проходными сечениями жидкости и газа (для коррекции расходов компонентов и определения влияния геометрических характеристик на удельные параметры двухфазного жидкостно-газового эжектора).

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:

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

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);

Вклад автора в проведенное исследование.

1. Выбор математических моделей, программ расчета, численных и параметрических расчетов процессов течения двухфазного рабочего тела в двухфазных эжекторах;
2. Разработка конструкции моделей для численного моделирования и экспериментального исследования;
3. Формированию состава и облика экспериментальной установки;

4. Проведение экспериментов и обработка полученных результатов.

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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, сформулирована цель и задачи исследования, отражена 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.

Выявлено отсутствие единой теории жидкостно-газового эжектора в настоящее время. 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 качественную теорию такого эжектора до сих пор не представлялось возможным. 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.

Описываются области применения двухфазных жидкостно-газовых эжекторов:

- Высотные испытания.
- Снятие кавитационных характеристик насосов.
- Захолаживание.
- Смесеобразование.

Отдельно рассмотрены высотные испытания как наиболее энергозатратная область применения. 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 эжекторы. При этом для создания глубокого разрежения, ввиду того, что степень повышения давления эжектируемого газа в указанных аппаратах небольшая, приходится использовать несколько ступеней подобных эжекторов.

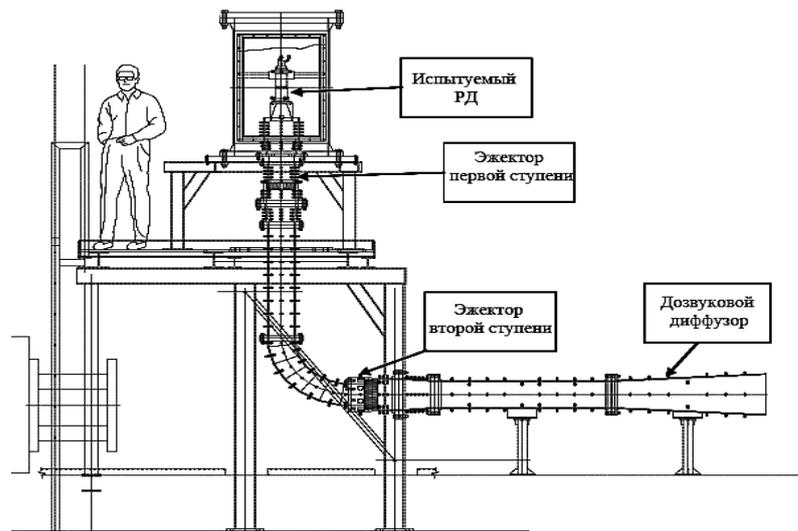


Рисунок 1. Схема стенда ЖРД с использованием газ-газового эжектора.

В случае использования газ-газовых эжекторов (рисунок 1) требуются большие расходы газа на последних ступенях, диаметры и длины выходных ступеней существенно увеличивают площадь стендового комплекса, а для парогазовых эжекторов на выходе из ступеней устанавливают теплообменный аппарат для конденсации пара и охлаждения эжектируемого газа. Применение для указанных целей жидкостно-газовых эжекторов 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 эжектора 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.

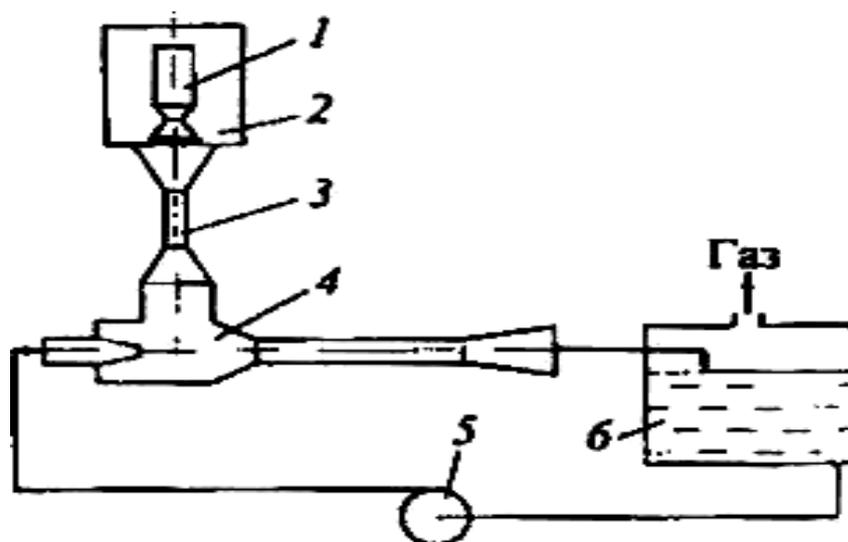


Рисунок 2. Схема стенда ЖРД МТ с использованием двухфазного жидкостно-газового эжектора.

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

На рисунке 2 приведена принципиальная схема стенда для огневых испытаний реактивных двигателей в высотных условиях с двухфазным жидкостно-газовым эжектором на выхлопе продуктов сгорания. Кроме насосной в этой схеме может быть использована и вытеснительная система подачи жидкости в эжектор. Двухфазный эжектор за счет энергии воды сжимает продукты сгорания с давлением за газодинамическим диффузором до давления в сепараторе.

Далее рассмотрены методики оценки эффективности двухфазного жидкостно-газового эжектора в качестве устройства создания разряжения и в качестве устройства создания двухфазной струи с заданными параметрами.

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 (числитель формулы 2) к гидравлической мощности затраченной на создание требуемого режима работы форсунки двухфазного эжектора, формула (1). Изотермической работа газа принимается в виду много большей теплоемкости жидкости чем газа.

$$N_{\text{гидравлическая}} = H \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot G_{\text{ж}} \cdot g \quad (1)$$

где H – напор жидкости в метрах.

$$\eta_{\text{из}}^{\text{жг}} = \frac{G_{\text{г}} R_{\text{г}} T_{\text{с0}} \ln \frac{P_{\text{с0}}}{P_{\text{гоп}}}}{H \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot G_{\text{ж}} \cdot g} \quad (2)$$

Зависимость (2) в полной мере характеризует энергетические параметры двухфазных жидкостно-газовых эжекторов и позволяет производить сравнительную оценку их эффективности.

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

$$\varphi_1 = \frac{W_{\text{ср см}}}{W_{\text{т}}} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{см}} = \varphi_1^2 \quad (4)$$

$$\varphi_2 = \frac{W_{\text{жср}}}{W_{\text{ср см}}} \quad (5)$$

$$\eta_{\text{ксм}} = \frac{\varphi_2^2 \cdot (\Pi_1 + \varepsilon^2)}{\Pi_1} \quad (6)$$

$$\eta_{\text{ксм}} = \varphi_2^2 \quad (7)$$

$$\eta_{\text{эж}} = \eta_{\text{ксм}} \cdot \eta_{\text{см}} = \frac{\varphi_1^2 \cdot \varphi_2^2 \cdot (\Pi_1 + \varepsilon^2)}{\Pi_1} \cong \varphi_1^2 \cdot \varphi_2^2 \quad (8)$$

Вторая глава посвящена объекту исследования, граничным условиям и описанию используемых математических моделей, примененных при численном

моделировании процессов, происходящих в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе и за его пределами. Приводится реализация численного моделирования в ANSYS CFX, а также результаты расчетно-теоретического исследования. На основе работ других авторов производится выбор модели турбулентности для двухфазного потока. 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 3).

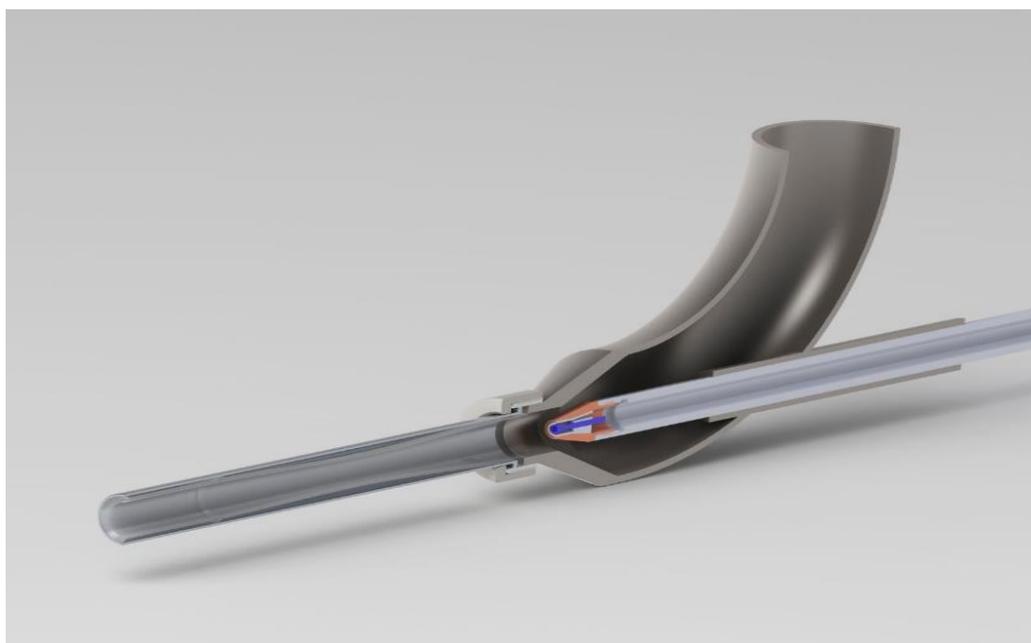


Рисунок 3. 3D модель экспериментального жидкостно-газового двухфазного эжектора.

Исследуемый эжектор (Рисунок 4) состоит из струйной форсунки 1 с регулируемым проходным сечением, профилированной сверхзвуковой камеры смешения 2, трубки подачи воды - регулятора положения 3 форсунки 1 в эжекторе 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.

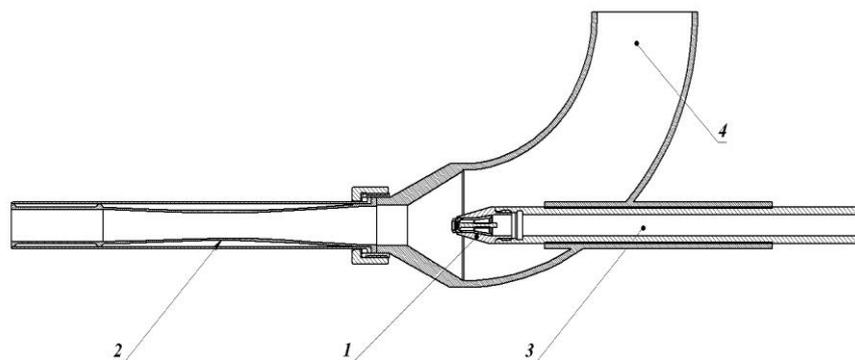


Рисунок 4. Конструкция эжектора в сборе.

Подача жидкости в камеру смешения двухфазного жидкостно-газового эжектора осуществляется через струйную форсунку с регулируемым проходным сечением (Рисунок 5). Она состоит из регулировочного винта, так называемого центрального тела форсунки (ЦТФ). Центральное тело ввернуто в пилообразное перекрестие. Вворачивая или выворачивая ЦТФ изменяется проходное сечение форсунки и расход жидкости [1,4,5].

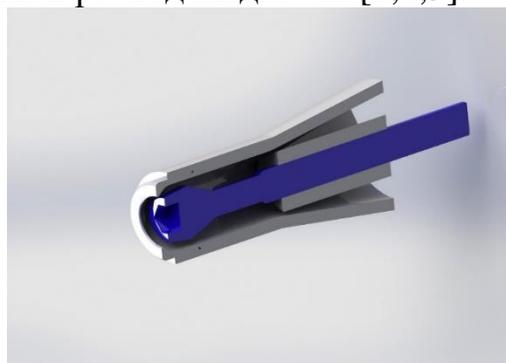


Рисунок 5. 3d модель регулируемой форсунки

Приводятся основные уравнения и допущения моделей расчета.

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 α , β , γ , 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 (9):

$$V_1 = r_1 V \quad (9)$$

Общее количество фаз для нашего конкретного случая определено как 2.

Важно провести различие между плотностью фазы и эффективной плотностью газо-жидкостной среды 1. Плотность материала фазы, ρ_1 является плотностью среды, только если представлена одна единственная фаза, то есть масса фазы α на единицу объема фазы 1. Эффективная плотность определяется следующим образом:

$$\rho_1^{\sim} = r_1 \rho_1 \quad (10)$$

Фактическая масса на единицу объема фазы 1, учитывая, что фаза 1 занимает только часть объема, определяет плотность двухфазной смеси как:

$$\rho = \rho_1 r_1 + \rho_2 r_2 \quad (11)$$

Учтём, что плотность газовой фазы определяется как:

$$\rho_1 = \frac{p}{RT} \quad (12)$$

А плотность жидкости для нашего конкретного случая постоянна:

$$\rho_2 = const \quad (13)$$

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

$$c_p = c_{p1} \chi_1 + c_{p2} \chi_2 \quad (14)$$

, где: χ_1 – массовая доля газовой фазы;
 χ_2 – массовая доля жидкой фазы.

$$\chi_1 = \frac{G_1}{G_1 + G_2} \quad (15)$$

$$\chi_2 = \frac{G_2}{G_1 + G_2} \quad (16)$$

, где: G_1 – массовый расход газовой фазы;
 G_2 – массовый расход жидкой фазы.

Рассмотрим отношения параметров фаз: массовых расходов

$$\bar{G} = \frac{G_2}{G_1} \quad (17)$$

и отношение плотностей:

$$\bar{\rho} = \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (18)$$

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

$$\frac{G_2}{G_1} = \frac{r_2 \rho_2 w_2 F}{r_1 \rho_1 w_1 F} \quad (19)$$

с учетом (10), (11), (18) объемная доля газовой фазы принимает следующий вид:

$$r_1 = \frac{1}{\frac{G}{\rho} + 1} \quad (20)$$

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 (10-16) и условием:

$$\mu = \mu_1 + \mu_2 \quad (21)$$

, Где μ коэффициенты молекулярной вязкости.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \operatorname{div} \vec{W} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial \vec{W}}{\partial t} + (\vec{W} \cdot \vec{\nabla}) \vec{W} = \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p + \frac{v}{3} \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{W}) + v (\vec{\nabla} \cdot \vec{\nabla}) \vec{W} + \vec{\nabla} S^* \quad (23)$$

, Где:

$$v = \frac{\mu}{\rho} \quad (24)$$

коэффициент кинематической вязкости,

\vec{W} – вектор скорости,

S^* -тензор турбулентных напряжений:

$$S^* = \begin{bmatrix} -\rho w_x'^2 & -\rho w_x' w_y' & -\rho w_x' w_z' \\ -\rho w_x' w_y' & -\rho w_y'^2 & -\rho w_y' w_z' \\ -\rho w_x' w_z' & -\rho w_x' w_y' & -\rho w_z'^2 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left(c_h T + \frac{W^2}{2} \right) = \left[\mu \Delta \vec{W} + \frac{1}{3} \mu \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{W}) \right] \vec{W} + \mu D + Q_w \quad (26)$$

, 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 сторонних работах посвященных турбулентности в двухфазных потоках.

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

Расход Жидкости грамм в секунду	Площадь сечения форсунки мм ²
170	1,8345
205	3,9758
240	5,7368
275	7,1182

Таблица 1. Массовые расходы и проходные сечения регулируемой форсунки

Для моделирования была выбрана модель турбулентности SST, которая объединяет в себе лучшие качества $k - \varepsilon$ и $k - \omega$ моделей. Является некой гибридной моделью турбулентности, основанной на использовании в пристеночной области $k - \omega$ модели, а в ядре потока – $k - \varepsilon$ модели. Такой комбинированный подход заключается в преобразовании уравнений $k - \varepsilon$ модели к $k - \omega$ формулировке с помощью стыковочной функции вблизи поверхности и $F_1 = 0$ за пределами пограничного слоя.

В модели турбулентности SST турбулентная вихревая вязкость вычисляется из турбулентной кинетической энергии и удельная скорость диссипации: Коэффициент турбулентной вязкости определяется по формуле:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\omega} \quad (20)$$

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

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega S F_2)} \quad (21)$$

$$\text{где: } v_t = \mu_t / \rho \quad (22)$$

Стыковочные функции в модели SST определяются следующими формулами:

$$F_1 = \tanh(\text{arg}_1^4) \quad (23)$$

$$\text{arg}_1 = \min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k} \cdot 500\nu}{\beta' \omega y' y^2 \omega}\right) \frac{4\rho k}{CD_{k\omega} \sigma_{\omega 2} y^2}\right) \quad (24)$$

Где: y - расстояние до ближайшей стенки; μ - кинематическая вязкость;

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} 1.0 \cdot 10^{-10}\right) \quad (25)$$

$$F_2 = \tanh(\text{arg}_2^2) \quad (26)$$

$$\text{arg}_2 = \max\left(\frac{\sqrt{k} \cdot 500\nu}{\beta' \omega y' y^2 \omega}\right) \quad (27)$$

Исходя из условия снижения ресурсозатратности численного моделирования, а 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 рисунке 6. Сетка состоит из эжекторной части и струйной и включает 17715233 элемента и 8333773 узлов.

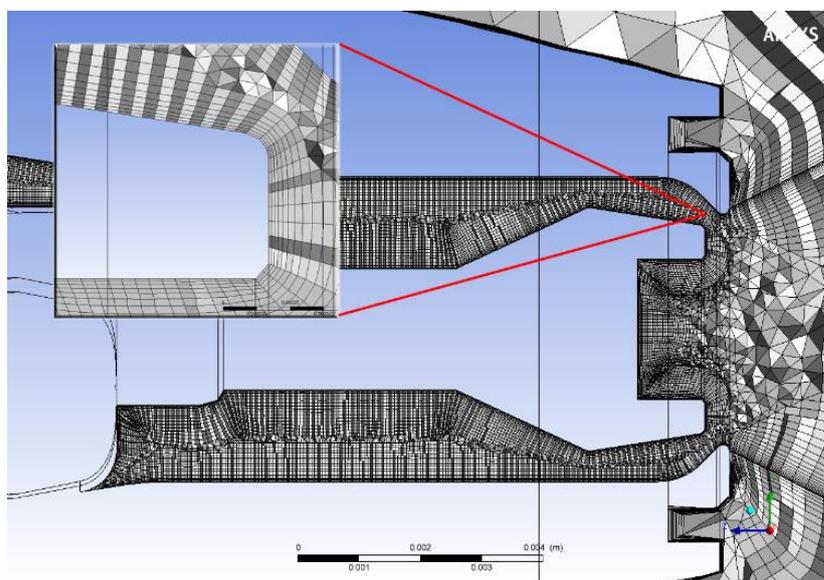


Рисунок 6. Расчетная сетка в районе среза форсунки.

При сравнении результатов численного моделирования процесса истечения жидкости из пластиковой острокрытой форсунки с пилонами и центральным телом образующим кольцевой канал, с результатами численного моделирования процесса истечения жидкости из металлической регулируемой форсунки (Рисунок 6) было обнаружено, что металлическая форсунка имеет существенные гидравлические потери по ее тракту. 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.

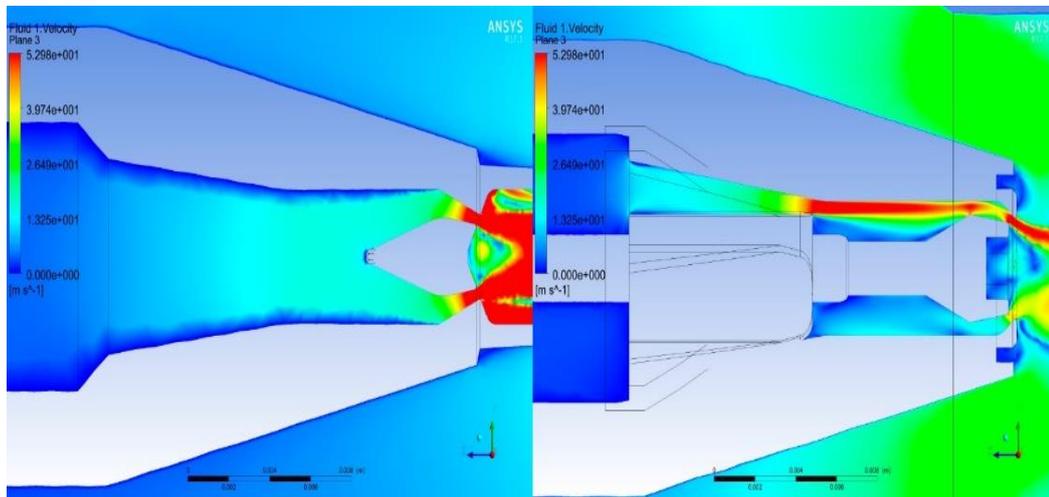


Рисунок 6. Течение жидкости в пластиковой форсунке (слева) и в металлической регулируемой (справа).

В дальнейшем при проектировании смесительного элемента эта проблема решается изменением конструкции и проектированием форсунки под конкретный режим работы эжектора.

Результаты численного моделирования струи двухфазного жидкостно-газового эжектора приведены на рисунке 7.

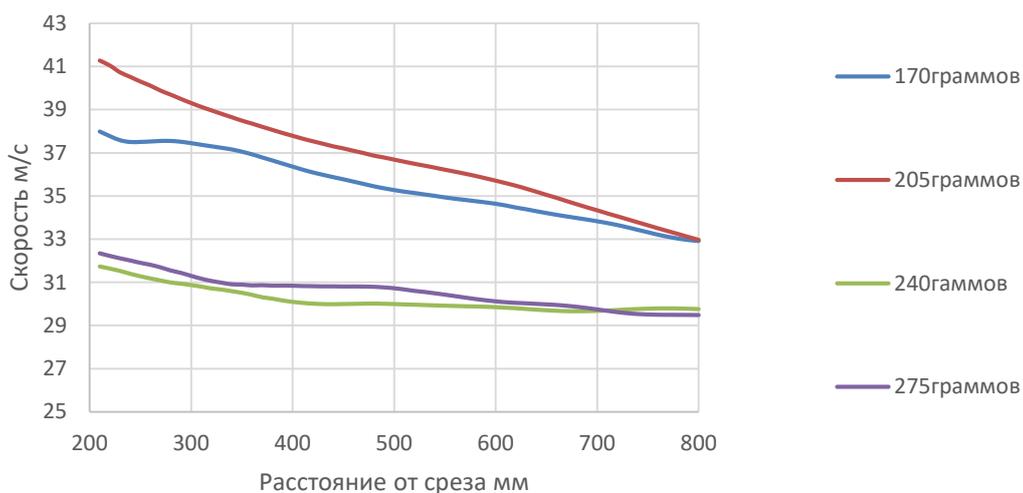


Рисунок 7. Результаты расчета скоростей струи на расстоянии 200-800мм от среза сопла эжектора при разных расходах жидкости.

В третьей главе приводится описание стенда для измерения параметров двухфазных потоков, схема стенда (Рисунок 8) и описание методов

экспериментальных исследований доступных на стенде для анализа двухфазных потоков.

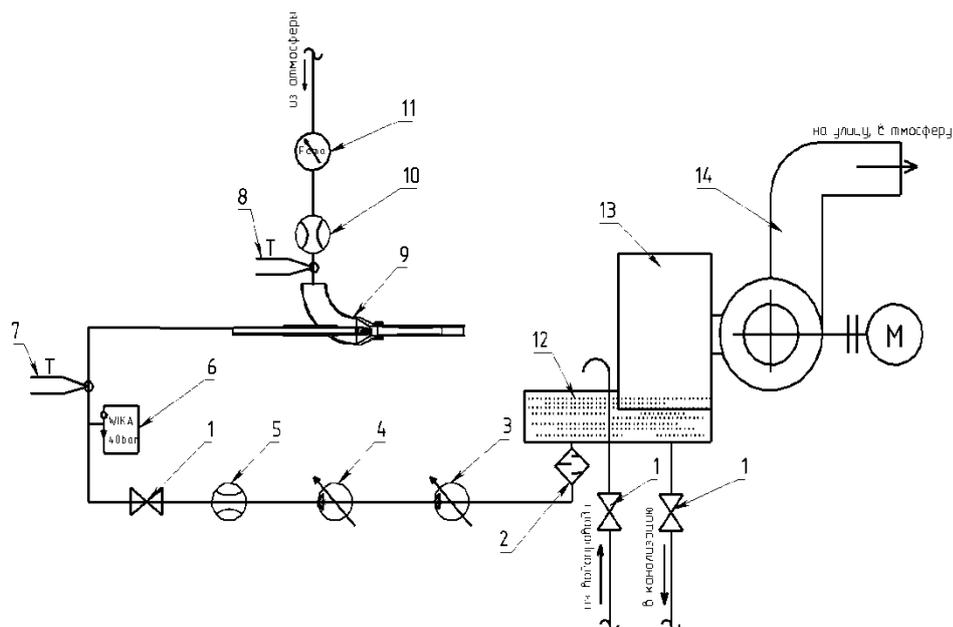


Рисунок 8. Упрощенная схема экспериментальной установки.

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.

При испытаниях использовались следующие методы измерения:

- Измерение дисперсности потока методом малоуглового рассеивания.
- Скоростная видеосъемка и определение размеров скоростей и распределений дисперсной фазы.
- PIV метод измерения полей скоростей дисперсной фазы.
- Теневой метод определения размеров дисперсной фазы.

Приводятся результаты испытаний различных смесительных элементов спроектированных с учетом ранее проделанных предварительных экспериментов [2,3,6,7,8,9] и обоснование применения острокрытых щелевых

форсунок в жидкостно-газовых двухфазных эжекторах. На рисунке 9 продемонстрирован процесс перехода от пластиковых выращенных форсунок с одним или комбинаций отверстий к пластиковой острокрытой щелевой форсунке и создание металлической регулируемой острокрытой щелевой форсунки.

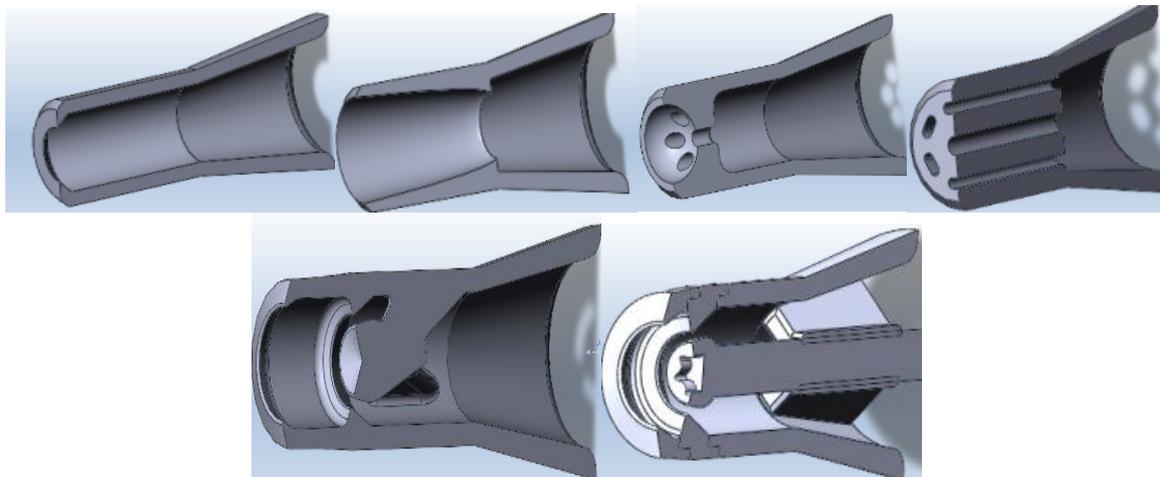


Рисунок 9. Слева сверху пластиковые форсунки с одним отверстием, справа с семью, снизу слева пластиковая острокрытая форсунка, справа металлическая регулируемая форсунка.

Металлическая регулируемая 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, концентричность обеспечивается посадкой центрального пилоновидное тела по конусу корпуса форсунки.

В таблице 2 приводится сравнение результатов основных параметров, полученных из расчетов и экспериментов.

мж (г)	мг расч (г) P=1ата	мг эсп (г) P=1ата	Размер капель (мкм)	Рата min	Wэж (м/с)	Угол Расп.	Wфорс (м/с)
170	7,3	7,0	350	0,6	38	10	55
205	7,1	6,8	410	0,4	37	18	52
240	6,0	6,3	440	0,03	34	20	50
275	6,2	6,5	420	0,02	33	30	49

Таблица 2. Сводная таблица результатов расчетов и экспериментов.

На рисунке 10 приводится сравнение результатов расчетов и экспериментов и оценка погрешности расчета относительно эксперимента. Синими точками обозначаются экспериментальные данные, красная линия это интерполяция третьего порядка по экспериментальным точкам. Зеленая линия – результат расчета. Скорость измерялась по оси струи в центре потока.

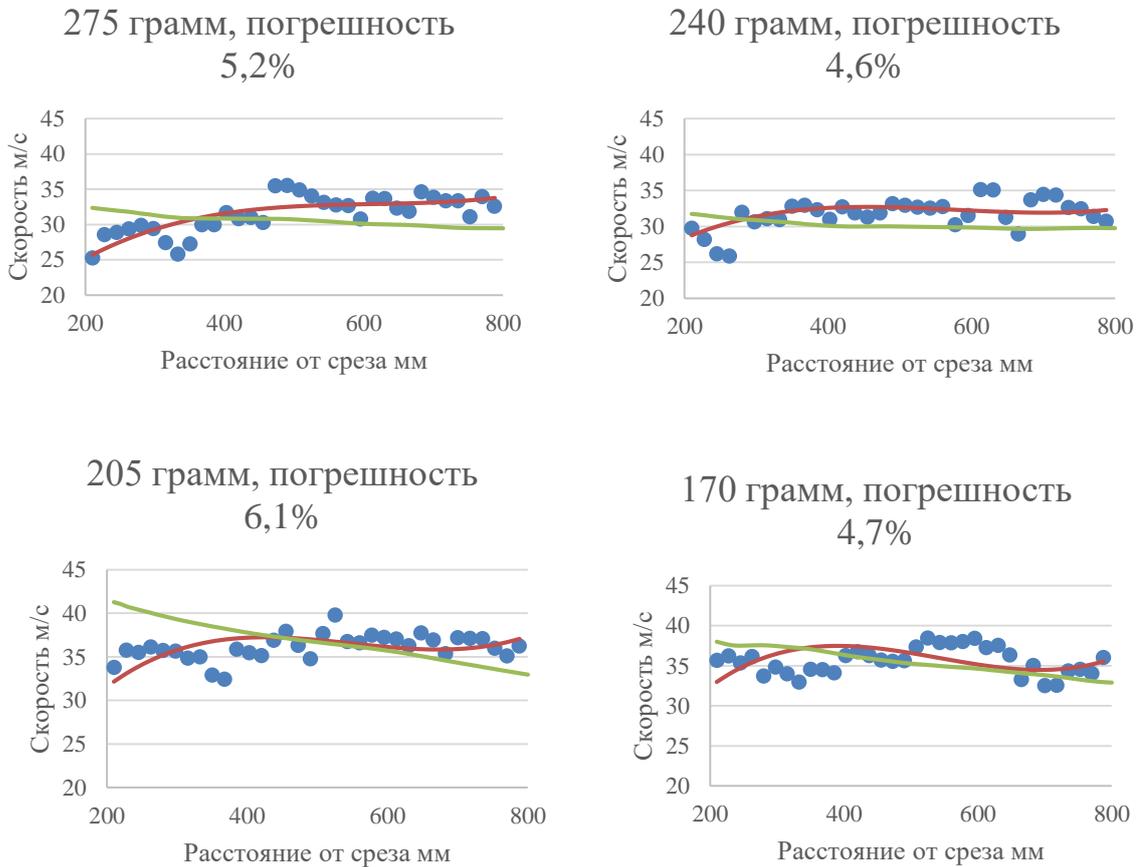


Рисунок 10. Сравнение результатов расчета скорости струи двухфазного жидкостно-газового эжектора и результатов съемки PIV методом.

На рисунке 11 приведены результаты испытания модельного двухфазного жидкостно-газового эжектора на максимальное разрежение [1,4,5]

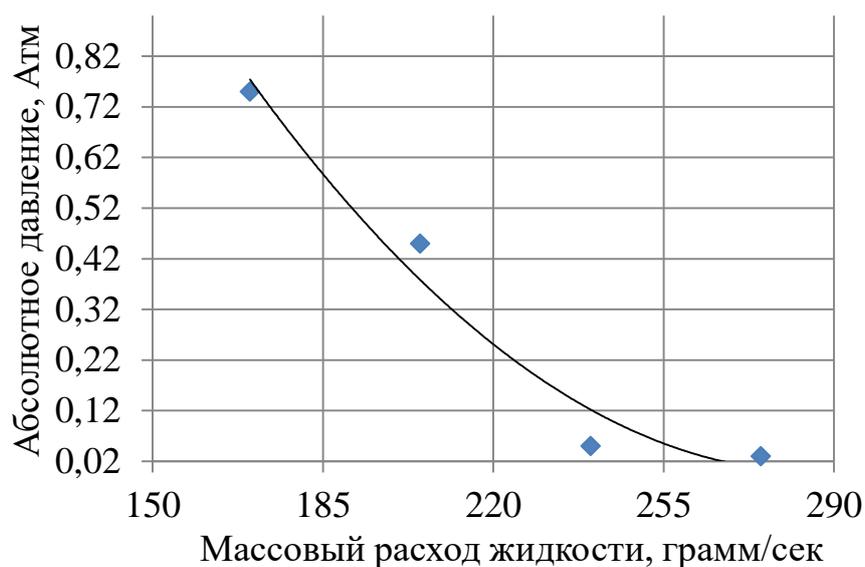


Рисунок 11. Зависимость максимально достигаемого абсолютного давления на входе в эжектор от расхода жидкости.

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 на рисунке 12 видны как отдельные капли, так и участки высокой концентрации жидкости [1,4,5].

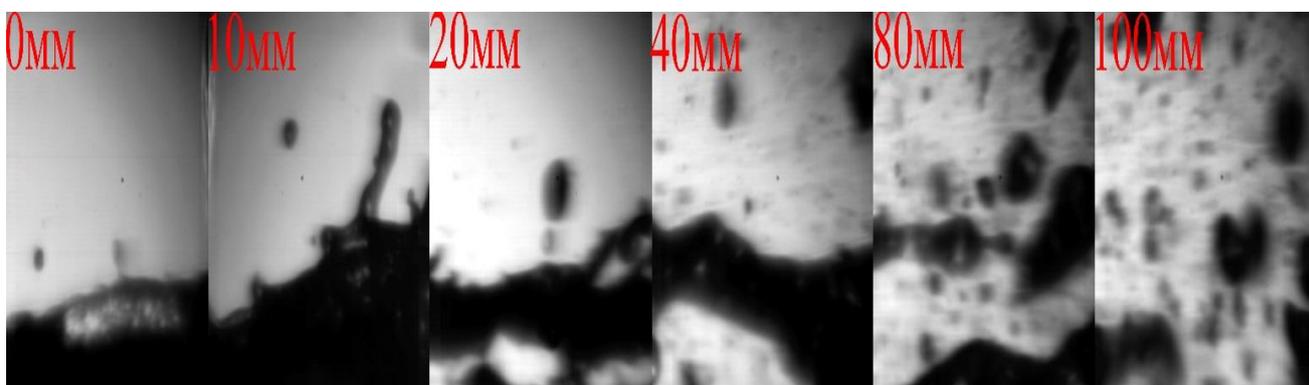


Рисунок 12. Процесс развала струи по мере удаления от среза сопла эжектора.

На расстоянии 100 - 300 мм образования жидкой фазы имеют наиболее сложную и не обычную форму (Рисунок 13) 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 [1,4,5].

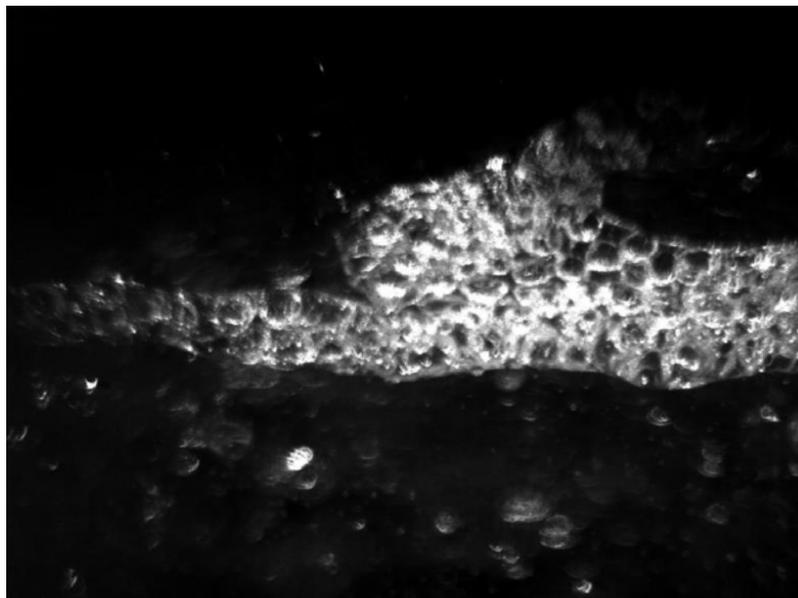


Рисунок 13. Структура капли двухфазного потока.

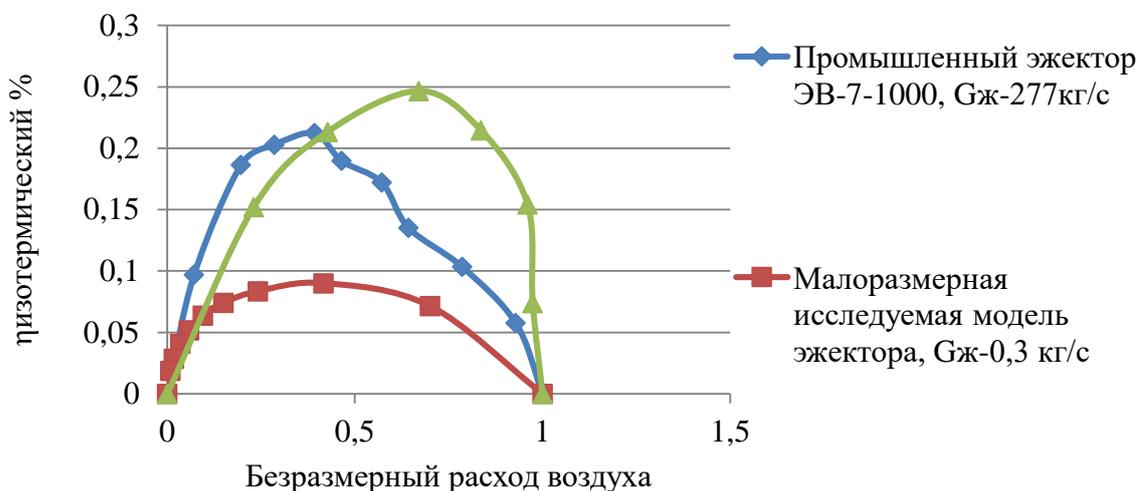


Рисунок 14. Зависимость КПД различных эжекторов от безразмерного расхода эжектируемого воздуха.

На основании анализа расчетных и экспериментальных данных можно сделать заключение о том, что расчетная методика обеспечивает хорошее прогнозирование параметров рабочего процесса в двухфазном жидкостно-газовом эжекторе. Данный подход к проектированию позволяет достичь лучших параметров, таких как коэффициент эжекции, разрежение на входе, при меньших затратах энергии (Рисунок 14). Изложены доводы для использования данного подхода на ранних этапах проектирования жидкостно-газовых двухфазных эжекторов для стендов высотных испытаний ракетных и авиационных двигателей и их агрегатов.

1. В случае, если конструкция форсунки двухфазного жидкостно-газового эжектора обладает свойствами осевой симметрии численное моделирование внутренних процессов может проводится в секторной

расчетной области. Этот метод предварительного расчета позволяет получить интегральные характеристики двухфазного жидкостно-газового эжектора с минимальными затратами времени и вычислительных мощностей.

2. Для более точного определения удельных параметров двухфазного жидкостно-газового эжектора 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 двухфазного жидкостно-газового эжектора 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^+ , уменьшения количества элементов сетки и ускорения процесса её построения.

4. Для описания турбулентности рекомендуется модель SST.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты и выводы:

1. Анализ моделей расчета, изложенный в обзоре работ, показал одномерный характер описания процессов, протекающих в СА, не отражающий современного подхода к численному моделированию двухфазных газожидкостных 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 острогрозный 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 в 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%.

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

Основное содержание и результаты диссертационной работы представлены в следующих публикациях:

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

1. Лепешинский И. А., Решетников В. А., Заранкевич И.А., Численное моделирование и экспериментальное исследование жидкостно-газового двухфазного эжектора со сверхзвуковым профилированным соплом // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2017. Т. 16. №2. С. 164 – 171.
2. Лепешинский И. А., Решетников В. А., Истомин Е. А., Заранкевич И.А., Смесительное устройство пузырьковой структуры открытого типа // Известия вузов. Авиационная техника. 2016. Т. 59. № 3. С. 71 – 75.
3. Лепешинский И.А., Решетников В.А., Заранкевич И. А., Истомин Е.А., Антоновский И.В., Гузенко А.А. Экспериментальное исследование газодинамического смесителя закрытого типа // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2016. Т. 15. №3. С. 70 – 80.

Публикации в других изданиях:

4. Лепешинский И.А., Заранкевич И.А., Казеннов И.С., Численное и экспериментальное моделирование двухфазного жидкостно-газового эжектора // 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.
5. 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 газокапельных струй // 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.
6. 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 // 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.
7. Лепешинский И. А, Решетников В. А, Антоновский И. В, Гузенко А. А, Зуев Ю. В, **Заранкевич И. А.** Смеситель с двухфазным рабочим телом // 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.
 8. **Заранкевич И.А.**, Антоновский И.В. Экспериментальное исследование газодинамического смесительного устройства закрытого типа // Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов; В 3 т. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) . – 2016. С. 690 – 691.
 9. 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 // Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения»: Сборник тезисов докладов. – 2016. С. 137 – 138.