

На правах рукописи



АНТОНОВСКИЙ ИВАН ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ДВУХФАЗНЫХ ГАЗОКАПЕЛЬНЫХ
СТРУЙ**

Специальность 05.07.05 – «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2016

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лепешинский Игорь Александрович

Официальные оппоненты: **Воронецкий Андрей Владимирович**
доктор технических наук, профессор, ФГБОУ
«Московский государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана (национальный
исследовательский университет)», профессор
кафедры «Ракетные двигатели».

Моллесон Галина Васильевна
кандидат технических наук, ФГУП «Центральный
аэрогидродинамический институт им. проф. Н.Е.
Жуковского», ведущий научный сотрудник научно-
исследовательского отдела.

Ведущая организация: Акционерное общество "Государственное научно-
производственное предприятие "Регион"

Защита состоится «26» декабря 2016 года в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.125.08, созданного на базе «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)» по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «Московского авиационного института (национального исследовательского университета)», <https://www.mai.ru/events/defence/>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 года.

Ученый секретарь диссертационного совета
Д 212.125.08
доктор технических наук, профессор

Зуев Юрий Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Данная работа посвящена исследованию и разработке устройств, формирующих двухфазные газокапельные струи с высокой концентрацией конденсированной фазы (капель), значительными скоростями и большой дальностью. Подобные устройства и струи, формирующиеся в них, в зависимости от параметров применяются для создания тяги двухсредных аппаратов: реактивных и гидрореактивных двигателей, организации высотных испытаний авиационной и ракетной техники, для распыливания топлива и организации процессов в камере сгорания двигателей. Важным обстоятельством является использование двухфазных газокапельных высококонцентрированных струй при нанесении противообледенительных составов на поверхности фюзеляжа и крыльев, закрытии задней полусферы реактивных двигателей и ракет от систем наведения противника, тушение пожаров на аэродромах, где требуется большая дальность тушащей струи, из-за высокой интенсивности при возгорании топлива. Кроме этого, они находят разнообразное применение в различных отраслях промышленности: в химической и пищевой, нефтегазодобывающей и нефтеперерабатывающей, теплоэнергетике, судостроении, энергомашиностроении, дезинфекции оборудования от радиоактивных загрязнений, аэрации карьеров, и т.д., т.е. там, где требуется большая дальность, мощность и другие специфические параметры таких струй. Анализ существующих разработок рассматриваемых устройств показывает весьма ограниченное число работ в этом направлении, причем основным и, пожалуй, единственным устройством способным формировать такие струи является камера смешения с газодинамическим соплом. Широкие возможности применения таких струй, недостаточная проработанность темы (отсутствие работ по альтернативным решениям) и возможность снижения материальных затрат на создание и работу устройства обеспечивают актуальность данной темы.

Актуальность представляемой работы обусловлена возможностью создания альтернативных устройств формирования газокапельных струй с высокой концентрацией конденсированной фазы, обеспечивающих лучшие характеристики и необходимостью создания методов расчета новых альтернативных устройств формирования двухфазных струй.

Объект исследования

Объектом исследования являются альтернативные устройства формирования двухфазных газокапельных струй с высокой концентрацией конденсированной фазы.

Предмет исследования

Предметом исследования являются газодинамические процессы формирования двухфазных газокапельных струй в альтернативных конструктивных устройствах и методы оптимизации их характеристик.

Целью работы является исследование новых способов формирования двухфазных газокапельных струй с высокой концентрацией конденсированной фазы, большой скоростью и дальностью действия.

Основные задачи диссертации:

В соответствии с целью работы ставятся и решаются следующие задачи:

1. Разработка и экспериментальное исследование новых смесителей закрытого типа с двухфазным рабочим телом и газокапельной структурой в камере смешения и вопросы оптимального проектирования эжектора с двухфазным рабочим телом.
2. Использование эжектора с двухфазным рабочим телом совместно с новым смесителем закрытого типа и газокапельной структурой двухфазного рабочего тела в качестве устройства формирования газокапельной струи.
3. Разработка математической модели расчета и оптимизации характеристик эжектора с двухфазным рабочим телом.
4. Теоретическое и экспериментальное исследование эжектора с двухфазным рабочим телом.
5. Разработка рекомендаций по использованию исследованных устройств формирования двухфазных струй в элементах реактивных двигателей.

Методы исследования

Метод исследования – расчетно-теоретическое и экспериментальное исследование.

Сравнительный анализ характеристик разработанных устройств с существующими.

Научная новизна

1. Предложены новые устройства формирования двухфазных газочапельных струй с высокой концентрацией конденсированной фазы различного применения: смесители закрытого типа с газочапельной структурой в камере смешения, эжектор с двухфазным рабочим телом высокой концентрации конденсированной фазы и профилированной камерой смешения, исключающей использование диффузора в системе эжектора.

2. Впервые предложена параметрическая модель оптимизации процесса в камере смешения эжектора, автоматически удовлетворяющая граничным условиям.

Практическая значимость результатов работы

1. Предложены новые устройства формирования двухфазных газочапельных струй, которые могут быть использованы при организации рабочего процесса в реактивных двигателях: смесители закрытого типа с газочапельной структурой в камере смешения, позволяющие снижать давление подачи топлива в камере сгорания; эжекторы, позволяющие формировать газочапельные струи, а при использовании в реактивных двигателях и других устройствах, иметь повышенный на 25% КПД по сравнению с существующими эжекторами.

2. Сформулирована математическая модель двухфазного рабочего тела, алгоритм и программа расчета, позволяющие оптимизировать параметры, определяющие характеристики эжектора.

3. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтвердили выводы о возможностях и характеристиках предложенных устройств.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных результатов, научных положений и выводов, содержащихся в диссертации, обуславливается удовлетворительным совпадением теоретических и экспериментальных результатов, полученных с использованием современных лазерно-оптических методов измерения параметров, а также сравнением с результатами других авторов, исследовавших устройства аналогичного назначения.

Реализация и внедрение результатов работы

Результаты работы использованы при выполнении научно-исследовательских работ (НИР):

1. Исследование смесительных устройств на основе использования пузырьковой и газочапельной структуры потоков и волновых эффектов в двухфазном потоке: отчёт о

НИР (промежуточный): Государственное задание № 2014/92, № проекта 289, НИР П-4120-02000/ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ, рук. Лепешинский И.А.; исполнит. Решетников В.А., Зуев Ю.В., Антоновский И.В. и др. – М., 2014.-175с. -№ ГР 1140902400016.

2. Исследование формирования и распространения двухфазной струи с использованием сопловых и эжекторных устройств: отчёт о НИР (промежуточный): Государственное задание № 2014/92, № проекта 289, НИР П-4120-02000/ Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) МАИ, рук. Лепешинский И.А.; исполнит. Решетников В.А., Зуев Ю.В., Антоновский И.В. и др. – М., 2015.-191 с. -№ ГР 1140902400016.

Апробация результатов

Результаты исследований, изложенные в диссертации, представлены в 3 отчетах, посвященных исследованию формирования двухфазных газокапельных струй с высокой концентрацией конденсированной фазы. Основные результаты работы опубликованы в 3 изданиях из перечня, рекомендованного ВАК Минобрнауки России [1-3], а также докладывались на конференциях: «XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015)» [4, 5]; Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике - 2015» [6]; «Климовские чтения – 2015. Перспективные направления развития двигателестроения» [9]; «XI Международной конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ'2016)» [10, 11]; «Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодежная научная конференция» [12, 13]; «Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения»» [14]

Личный вклад соискателя

Личное участие автора заключалось в:

1. Разработке математической модели, программ расчета, численных и параметрических расчетов процессов течения двухфазного рабочего тела в смесителях и эжекторах;
2. Разработке конструкции моделей для экспериментального исследования;
3. Формировании состава и облика экспериментальной установки;
4. Проведении эксперимента и обработке полученных результатов.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы. Диссертационная работа изложена на 147 машинописных страницах, содержит 122 рисунков, 8 таблиц, список литературы включает в себя 137 наименований.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Новые способы организации процесса формирования струй с двухфазным рабочим телом и устройства, его обеспечивающие: смесители, эжекторы.
2. Метод профилирования и оптимизации камеры смешения эжектора, обеспечивающий оптимизацию эжектора.
3. Теоретические и экспериментальные результаты исследования этих устройств.
4. Рекомендации по использованию результатов работы в реактивных двигателях и их элементах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение посвящено обоснованию диссертационного исследования, краткому описанию проблемы формирования двухфазных газочапельных струй с высокой концентрацией конденсированной фазы. Сформулированы актуальность темы исследования, объект и предмет исследования, цели, основные задачи, методы исследования, описана научная новизна, практическая значимость, реализация, внедрение, апробация и достоверность результатов работы.

В первой главе диссертации представлен обзор работ, посвященных смесительным устройствам и формированию струй с двухфазным рабочим телом. Условно устройства, получения двухфазных струй, рассматриваемые в работе, разделяются на две категории:

- 1) смесительные устройства
- 2) эжекторные устройства.

По результатам обзора были сделаны следующие выводы:

а) Отсутствие теоретических и экспериментальных работ, связанных с разработкой и исследованием смесительных устройств закрытого типа с двухфазной газочапельной структурой.

б) Отсутствие специальных теоретических и экспериментальных работ по использованию эжекторных систем для формирования двухфазных газочапельных

струй, за исключением использования таких струй в реактивных двигательных системах.

в) Имеющиеся теоретические и экспериментальные работы по эжекторам с двухфазным рабочим телом недостаточно учитывают дисперсный характер жидкостного потока и его взаимодействие с газовым потоком.

г) Отсутствие работ по профилированию и методам оптимизации камеры смешения и характеристик эжектора.

На основе проведенного обзора работ обоснована актуальность исследования смесителей закрытого типа с дисперсной газокапельной структурой в камере смешения смесителя и вопросы профилирования камеры смешения эжектора, а также оптимизации работы эжектора.

Во второй главе рассматривается установка для экспериментального исследования двухфазных течений с заданными параметрами по расходу и давлениям газовой и жидкой фазы при их смешении.

Принципиальная схема установки представлена на рисунке 1.

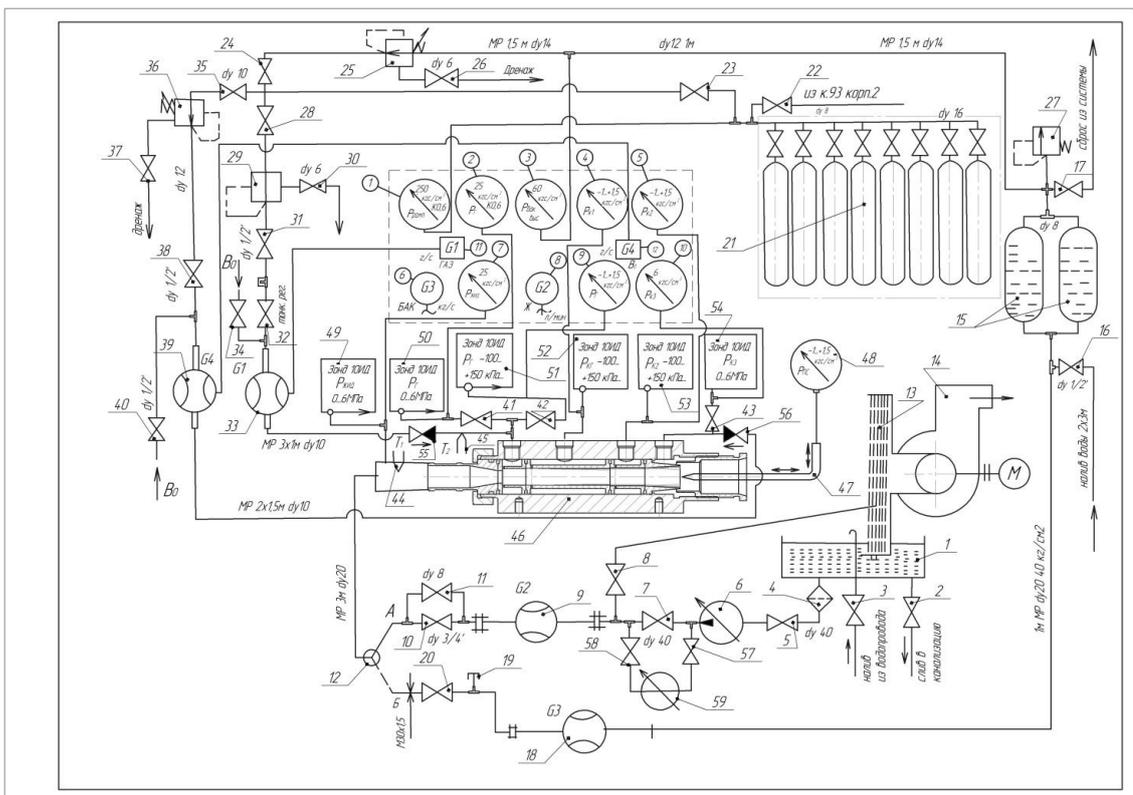


Рисунок 1. Принципиальная схема установки для экспериментального исследования двухфазных течений

Установку можно условно разделить на две части: гидравлический и пневматический контуры. Все измерительные приборы, необходимые для управления и

контроля над работой установки, вынесены на общую панель. На схеме они ограничены пунктиром.

Для определения полей скорости использовался PIV метод. Две камеры снимают в парном импульсном режиме, освещенные мощным лазером частицы с двух различных ракурсов. Это позволяет реконструировать смещение частиц в заданном объеме, путем обработки изображения и вычисления корреляционной функции.

Для измерения дисперсности частиц использовался лазерно-оптический метод рассеяния (рисунок 2)

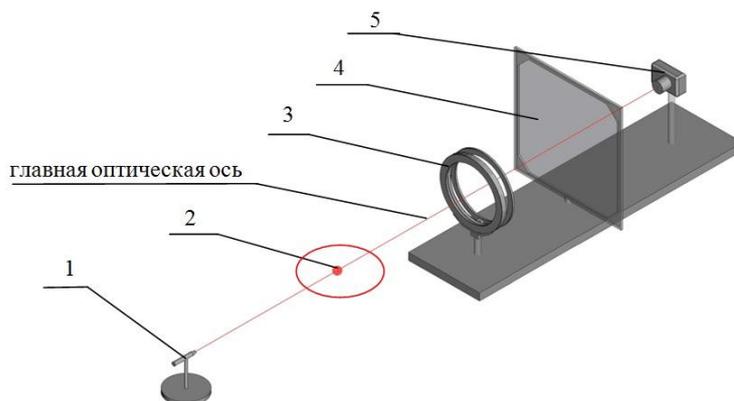


Рисунок 2. Схема измерения дисперсности частиц (1 – лазер, 2 – исследуемый объект, 3 – Фурье-линза, 4 – экран, 5 – фотоаппарат)

Во время экспериментов для каждого объекта исследования и каждого режима исследования регистрировались:

- показания интегральных датчиков, установленных в магистралях газодинамической установки (давления, расходы жидкости и газа, температуры);
- фотоизображение потока;
- индикатрисы малоуглового рассеяния для различных сечений потока (по ним далее вычислялась дисперсность частиц);
- лазерные изображения частиц PIV- метода, по которым вычислялись поля скоростей дисперсной фазы. Таким образом, получается достаточно полная картина течения двухфазного потока в исследуемом объекте, что и требуется для дальнейших исследований и расчетов.

В третьей главе представлены результаты исследования смесительного устройства закрытого типа, схема которого показана на рисунке 3.

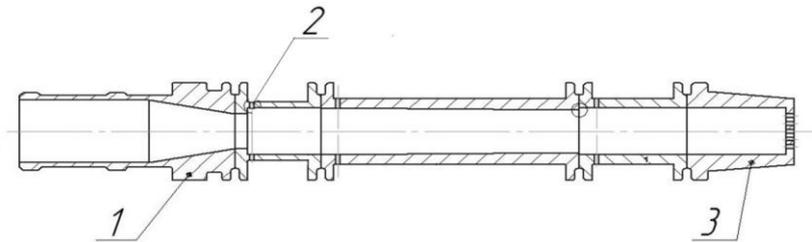


Рисунок 3. Схема смесительного устройства закрытого типа

Жидкость подается в смеситель с помощью сопла 1, воздух - через отверстия 2, полученная двухфазная смесь истекает через сопло 3.

Результаты расчета по определению диаметра соплового отверстия и расхода газа через смеситель в зависимости от давления на входе в смеситель показаны на рисунке 4.

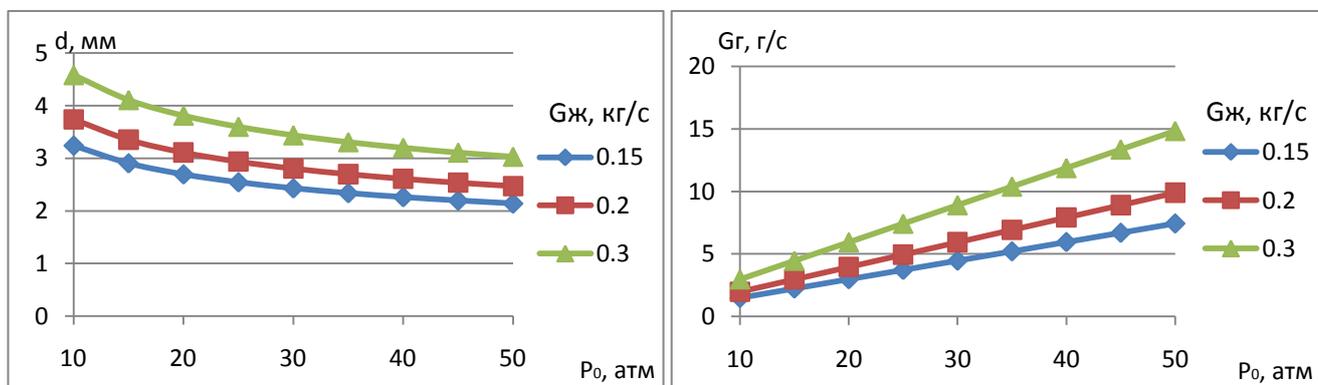


Рисунок 4. Зависимость диаметра пропускного отверстия (слева) и расхода газа через смеситель (справа) от давления на входе в смеситель (при различных расходах жидкости).

Также исследовалось влияние конструктивных особенностей сопел (позиция 3 на рисунке 3) на структуру двухфазной струи. Варьировались такие параметры, как толщина стенки, длина канала, число отверстий, диаметр отверстий. Все испытания проводились на одном режиме по расходу и давлению газа и жидкости. Примеры сопел показаны на рисунке 5.

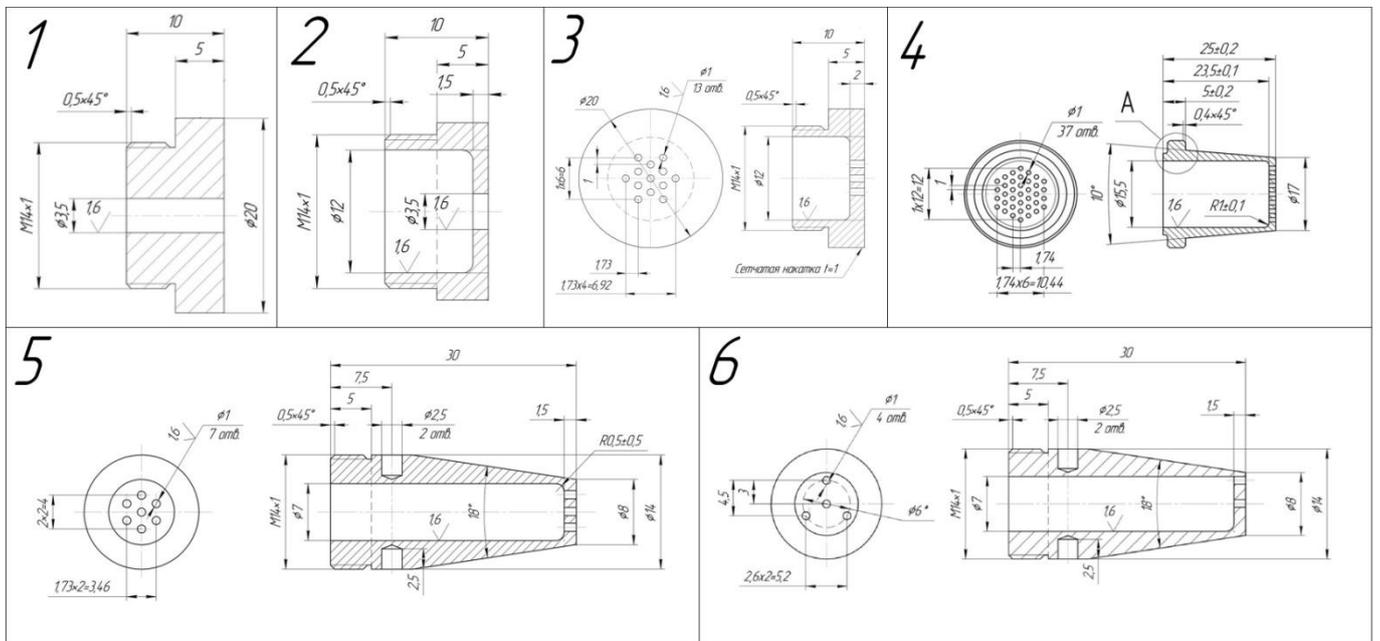


Рисунок 5. Сопла для исследования влияния конструктивных параметров на структуру и параметры газокапельной смеси

Исследование двухфазного потока на выходе из смесителя осуществлялось при помощи PIV-метода и метода рассеяния. После обработки экспериментальных данных были получены линии тока и модули скорости, карты полей горизонтальной и вертикальной скорости, дисперсности потока в различных сечениях струи и на разных режимах работы.

В качестве примера показаны экспериментальные результаты, полученные по смесителю с соплом № 1 (рисунки 6-9).

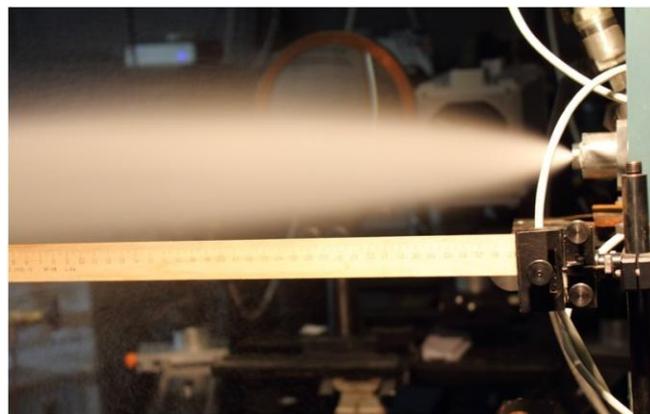


Рисунок 6. Фотография струи, полученной с помощью смесителя №1

По картам скоростей определялись профили скорости в заданном сечении в различные моменты времени (рисунок 9 слева). Затем проводилось осреднение (рисунок 9 справа).

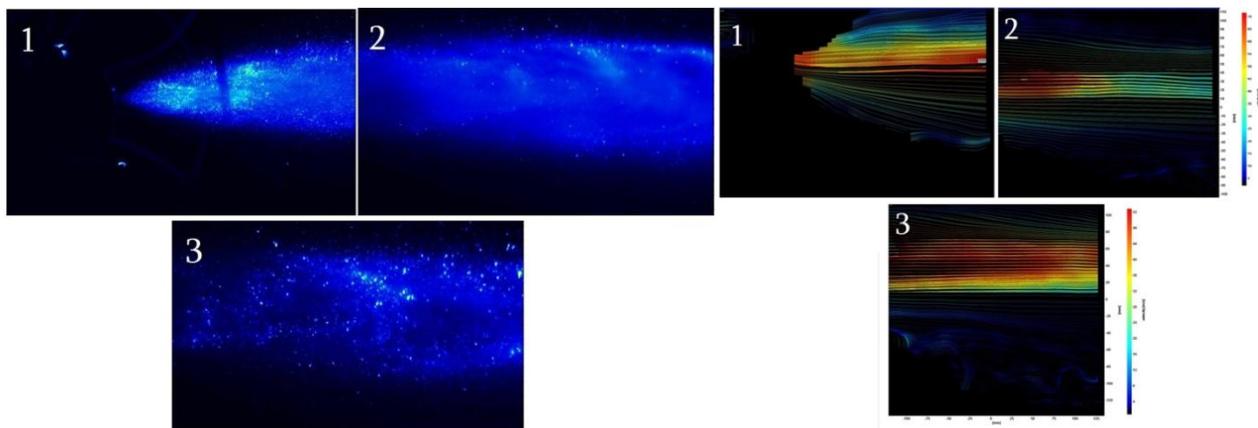


Рисунок 7. Первичное изображение, которое регистрируется за счет экспозиции в вертикальном лазерном ноже (слева); линии тока и модули скорости струи (справа) в трех сечениях (1 – срез смесителя; 2 – дальнейшее развитие струи; 3 – струя на большом расстоянии)

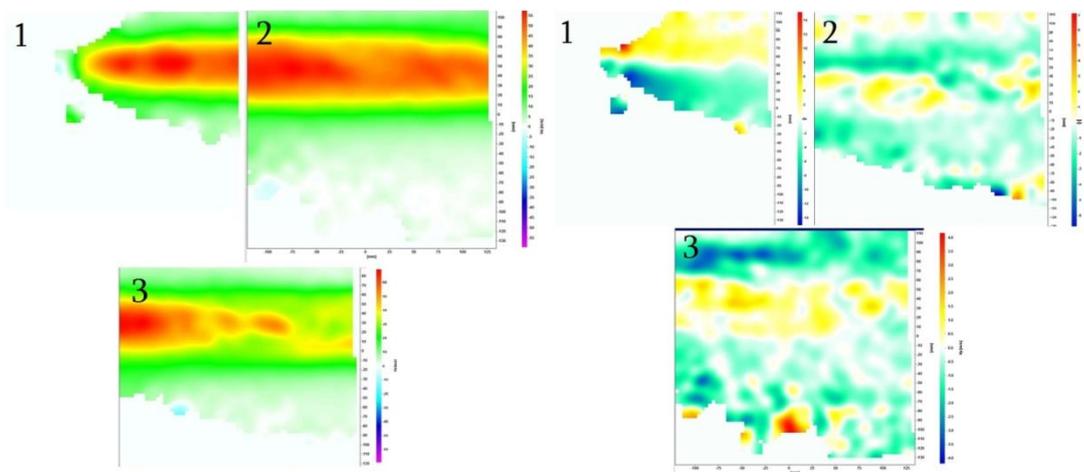


Рисунок 8. Карты полей скоростей проекций горизонтальной (слева) и вертикальной (справа) скоростей двухфазного потока

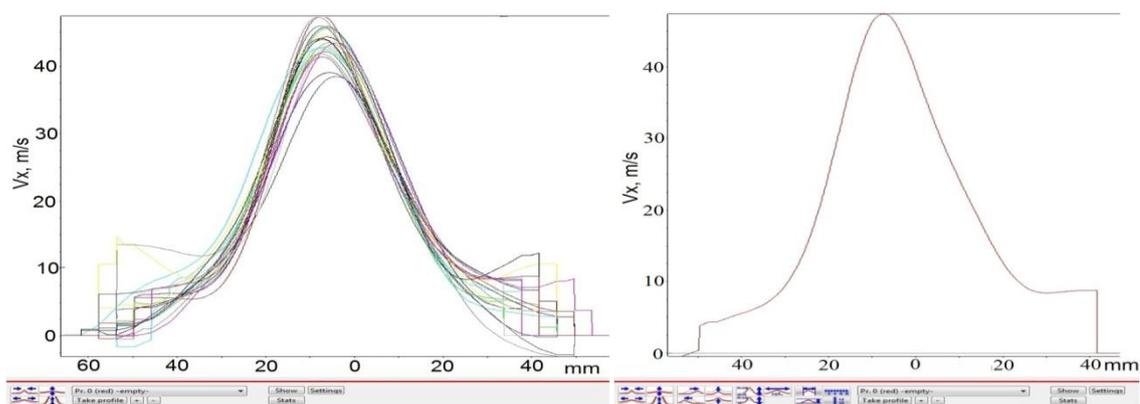


Рисунок 9. Профили скорости струи в различные моменты времени (слева); средние результаты (справа)

На рисунке 11 показаны поля дисперсности капель в поперечном сечении струи.

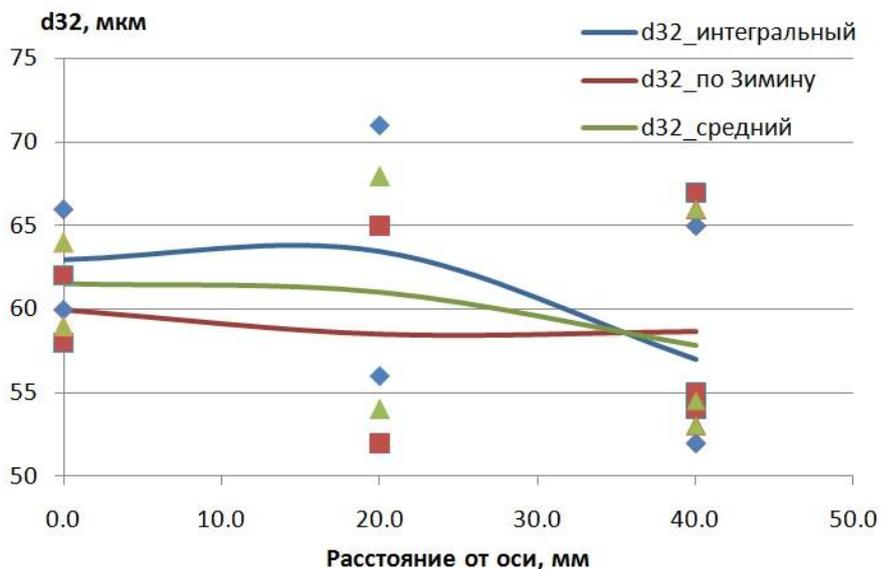


Рисунок 10. Дисперсность капель двухфазной газок капельной струи

Все смесители испытывались на газок капельном режиме течения внутри камеры смешения смесителя и соотношением массового расхода жидкости к массовому расходу газа 40:1. При этом обеспечивалась газок капельная структура течения по объёмной концентрации (в диапазоне от 0,6 до 0,95).

Особый интерес представляет сравнение смесителя с двухфазным рабочим телом со смесителем с однофазным рабочим телом, работающих на одинаковых режимах (сопла 5 и 6 рисунка 5 соответственно). На рисунке 11 показаны сравнительные скорости частиц двухфазного потока на расстоянии 100 и 250 мм от среза смесителей, сплошная линия соответствует смесителю с однофазным рабочим телом, пунктирная линия – смесителю с двухфазным рабочим телом. Как видно из графика, по всему участку струи смеситель с двухфазным рабочим телом обеспечивает более высокую скорость по сравнению со смесителем с однофазным рабочим телом.

По результатам исследования был сделан вывод, что использование двухфазного рабочего тела является эффективным способом улучшения характеристик форсунок.

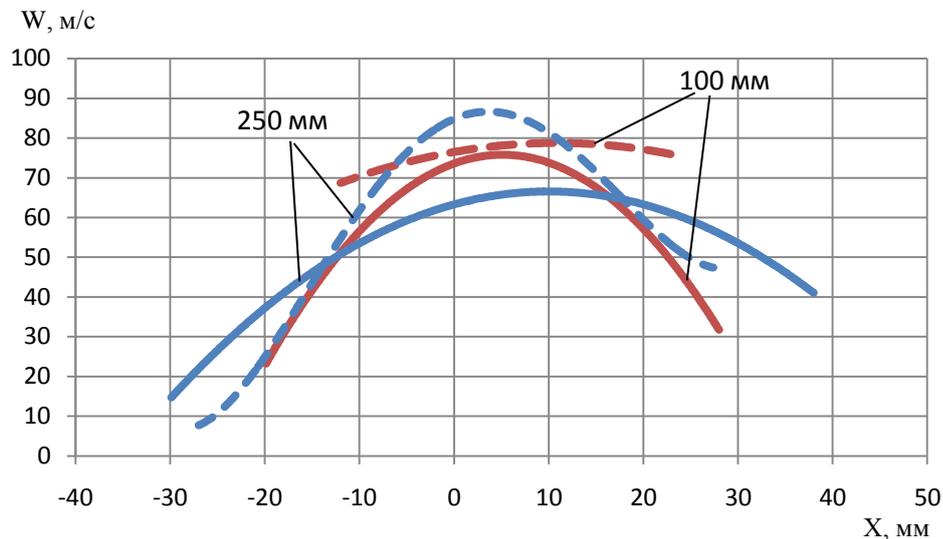


Рисунок 11. Сравнение скоростей двухфазных струй у смесителей с одно- и двухфазным рабочим телом (сплошная линия – смеситель с однофазным рабочим телом, пунктирная линия – смеситель с двухфазным рабочим телом; подписи соответствуют расстоянию от среза смесителей)

Результаты обработки показали, что в области небольших расходов воздуха (порядка 3-10 г/с) смеситель работает на режиме равенства подаваемых давлений жидкости и газа (рисунок 12), в отличие от форсунок камеры сгорания, которые используют высокое давление для впрыска топлива. Поэтому можно подавать топливо на газокапельном режиме при достаточно низком давлении, что влечет за собой снижение давления подачи насоса и увеличение ресурса, а также улучшение экономичности и снижение стоимости двигателя в целом.

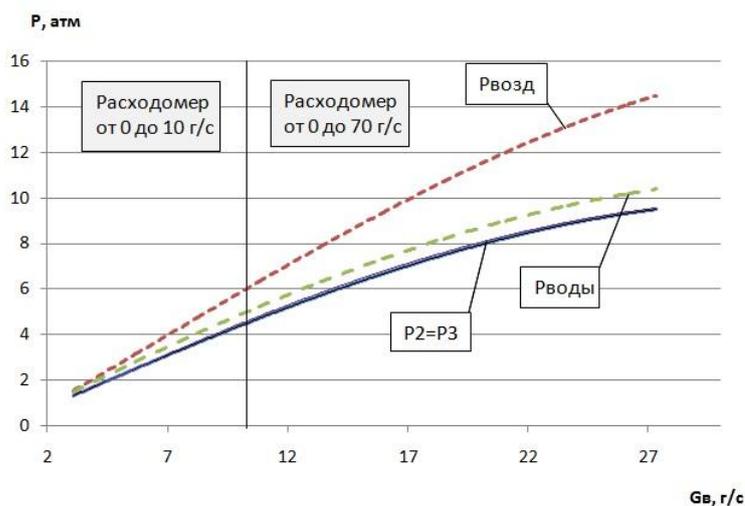


Рисунок 12. Зависимость давлений жидкости и газа в системе от расхода воздуха

В четвертой главе представлены результаты теоретического и экспериментального исследования эжектора с двухфазным рабочим телом.

Обзор существующих работ показал, что эжекторы с двухфазным рабочим телом использовали цилиндрическую камеру смешения с диффузором, а в качестве расчета использовалась гомогенная модель двухфазной среды, не учитывающая реальный капельный состав рабочего тела.

В качестве математической модели рассматривалась двухскоростная, двухтемпературная модель, позволяющая учесть межфазное взаимодействие в двухфазном потоке, связанное с термической и динамической неравновесностью фаз.

Основные уравнения математической модели расчета эжектора представлены ниже:

Уравнение неразрывности:

$$G_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} W_{\Gamma} S_{\Gamma} = const \quad (1)$$

$$G_{K} = \rho_{K} W_{K} S_{K} = const \quad (2)$$

Уравнение движения капель:

$$G_{K} \frac{dW_{K}}{dx} = -S_{K} \frac{dP}{dx} + \frac{S_{K}}{V_{K}} P_{\text{сопр}} \quad (3)$$

Уравнение движения двухфазного потока:

$$G_{\Gamma} \frac{dW_{\Gamma}}{dx} + G_{K} \frac{dW_{K}}{dx} = -S \frac{dP}{dx} - \frac{dF_{TP}}{dx} \quad (4)$$

Уравнение теплообмена:

$$G_{K}^* \frac{di_{K}}{dx} = \alpha \cdot f_{\text{пов}} (T_{\Gamma} - T_{K}) \frac{d\tau_{K}}{dx} \quad (5)$$

Уравнение энергии:

$$\left(i_{\Gamma} + \frac{W_{\Gamma}^2}{2} \right) G_{\Gamma} + \left(i_{K} + \frac{W_{K}^2}{2} \right) G_{K} = \left(i_{\Gamma 0} + \frac{W_{\Gamma 0}^2}{2} \right) G_{\Gamma 0} + \left(i_{K 0} + \frac{W_{K 0}^2}{2} \right) G_{K 0} \quad (6)$$

Уравнение состояния:

$$P = \rho_{\Gamma} R_{\Gamma} T_{\Gamma} \quad (7)$$

Здесь:

G_{Γ}, G_{K} - массовый, секундный расход газа и капель, ρ_{Γ}, ρ_{K} - плотность газа и капель, W_{Γ}, W_{K} - скорости газа и капель, T_{Γ}, T_{K} - температуры газа и капель, i_{Γ}, i_{K} -

удельные энтальпии газа и капель, S_G, S_K - сечения потока газа и капель, P - давление газа, m_K^*, V_K - масса и объем капли, S - сечение двухфазного потока, $P_{сопр}$ - сила сопротивления капли, $f_{пов}$ - площадь поверхности капли, $F_{тр}$ - сила трения потока о стенку канала эжектора, α - коэффициент теплоотдачи, τ_K - время, R_G - газовая постоянная. индекс «0»-параметры в начальном сечении, индекс «н» -параметры окружающей среды.

На основе этих уравнений решалась обратная задача, при этом задавалось двухпараметрическое распределение давления по длине эжектора,

$$\bar{P} = \frac{1+1/P_{27}}{2} + \frac{1-1/P_{27}}{2} \operatorname{sign} \left[\cos \left(\pi \left(\frac{x}{l_3} \right)^m \right) \right] \cdot \cos \left(\pi \left(\frac{x}{l_3} \right)^m \right)^n \quad (8)$$

где $\bar{P} = \frac{P}{P_0}$, $P_{27} = \frac{P_n}{P_0}$, $P_1 = \frac{G_K}{G_G}$, l_3 - длина камеры смешения эжектора, m и n

константы.

По заданной математической модели была написана программа на языке программирования Fortran. Программа предусматривает расчет как в относительных (безразмерных) величинах (для анализа), так и в абсолютных (размерных) величинах.

В формуле (8) имеются два параметра m и n , которые позволяют задавать любой закон распределения давления, при этом также можно варьировать длиной канала эжектора и получаемыми результатами. Граничные условия по давлению выполняются автоматически, что позволило провести параметрическую оптимизацию течения в эжекторе. Было рассмотрено влияние различных параметров на скорость частиц и геометрию канала.

Целью исследования было получение максимальной скорости жидкости на выходе из эжектора, при этом сохраняя бездиффузорную форму канала эжектора

На основе разработанной модели оптимизации камеры смешения эжектора было проведено численное сравнение эффективности двух эжекторов с двухфазным рабочим телом и смесителями с однофазным рабочим телом. Некоторые результаты расчетов представлены на рисунке 13. Параметры с индексом «профиль» относятся к профилированному эжектору, параметры с индексом «конус» к традиционному с диффузором.

Полученные результаты позволяют оценить сравнительную эффективность каждого эжекторов по КПД, в качестве которого использовалось выражение:

$$\eta_{\text{Э}} = \frac{G_{\Gamma} W_{\Gamma}^2 + G_{\text{Ж}} W_{\text{Ж}}^2}{G_{\text{Ж}} W_{\text{Ж}0}^2} = \frac{W_{\Gamma}^2 + \Pi_1 W_{\text{Ж}}^2}{\Pi_1 W_{\text{Ж}0}^2} \quad (9)$$

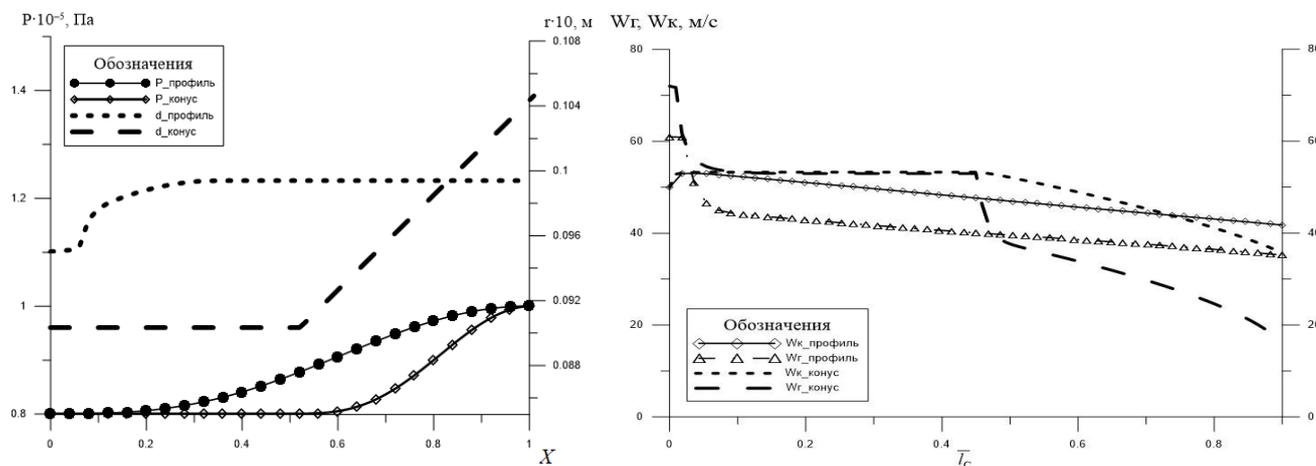


Рисунок 13. - Изменение давления P и радиуса каналов сравниваемых эжекторов вдоль канала эжекторов (слева) и изменение скоростей фаз капель $W_{\text{К}}$ и газа $W_{\text{Г}}$ вдоль канала сравниваемых эжекторов (справа)

Значения КПД профилированного эжектора составило величину $\eta_{\text{проф.}}=0,72$, а у стандартного $\eta_{\text{конус}}=0.58$. Отношение $\frac{\eta_{\text{проф.}}}{\eta_{\text{конус}}}=1,24$. Таким образом, за счет профилирования можно существенно повысить эффективность работы эжектора.

В результате расчета и оптимизации эжектора по исходным параметрам эжектор может иметь практически цилиндрическую камеру без диффузора (рисунок 14).

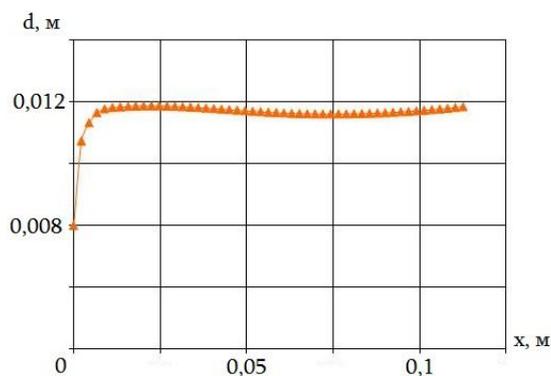


Рисунок 14. Проточная часть канала эжектора после оптимизации (отсутствует диффузор)

Экспериментальное исследование эжектора, так же как и смесителя, осуществлялось при помощи PIV-метода и метода рассеяния. После обработки экспериментальных данных были получены линии тока и модули скорости, карты полей горизонтальной и вертикальной скорости, дисперсности потока в различных сечениях струи, сформированной в эжекторе, и на разных режимах работы. Пример некоторых экспериментальных данных показан на рисунке 15.

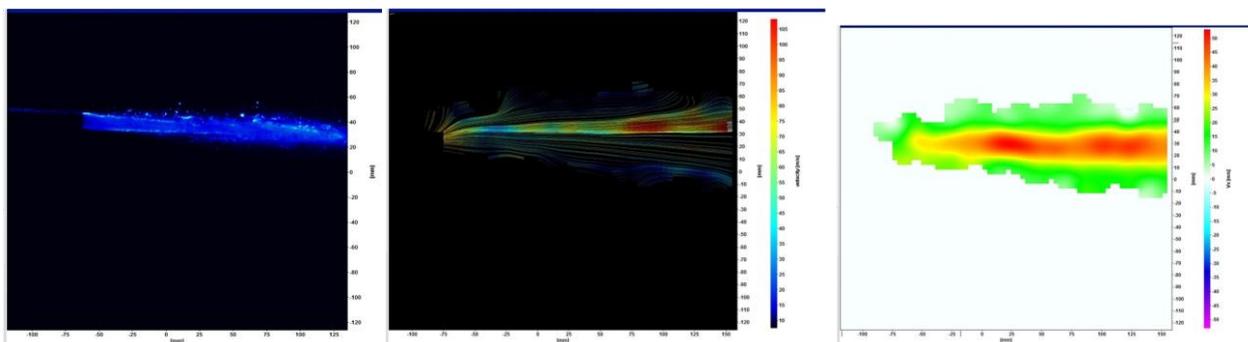


Рисунок 15. Результаты экспериментальных данных по исследованию эжектора

Для оценки работы эжектора со смесителем с двухфазным рабочим телом был спроектирован смеситель с однофазным рабочим телом, на основе которого и проводилось сравнение. Результаты сравнения двух эжекторов, которые работали на одинаковых режимах по расходу и давлению показаны на рисунке 16. Эксперимент показал, что при использовании эжектора со смесителем с двухфазным рабочим телом коэффициент эжекции может быть увеличен примерно на 20%.

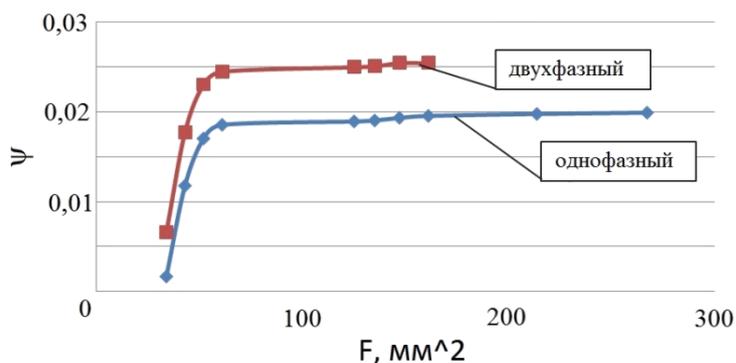


Рисунок 16. Сравнение характеристик эжекторов с однофазным и двухфазным смесителем.

При итоговом сравнении эжектора на основе смесителей с одно- и двухфазным рабочим телом видно, что эжектор со смесителем с двухфазным рабочим телом позволяет улучшить эффективность по сравнению с эжектором со смесителем с однофазным рабочим телом на 10-20% при прочих равных условиях (рисунок 17).

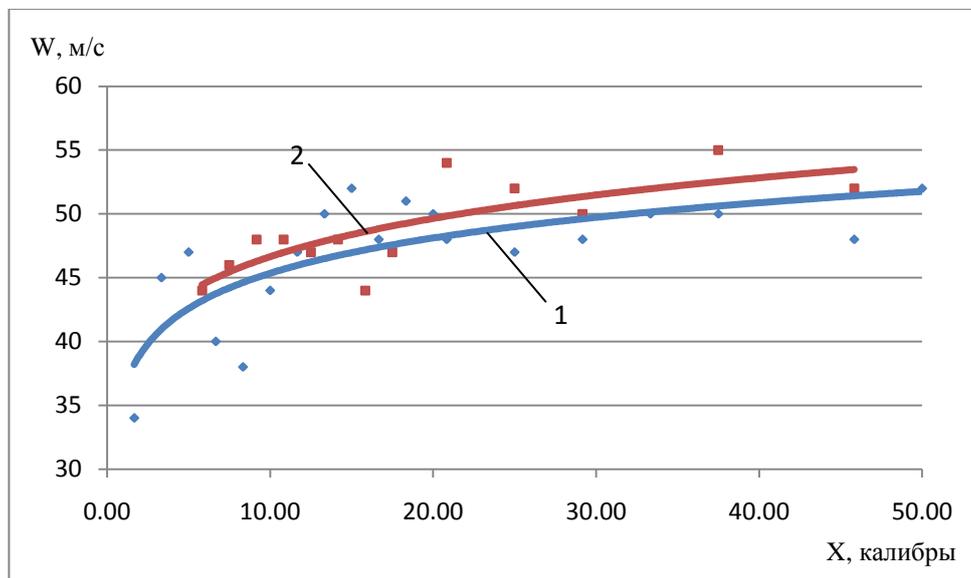


Рисунок 17. Сравнение скоростей газокapельных струй у эжекторов с одно- и двухфазным рабочим телом (1 – эжектор со смесителем с однофазным рабочим телом, 2 – эжектор со смесителем с двухфазным рабочим телом).

Зависимости скорости капель в поперечном сечении струи также показывают, что по всей длине струи эжектора со смесителем с двухфазным рабочим телом имеется преимущество по сравнению с эжектором с однофазным рабочим телом (рисунок 18).

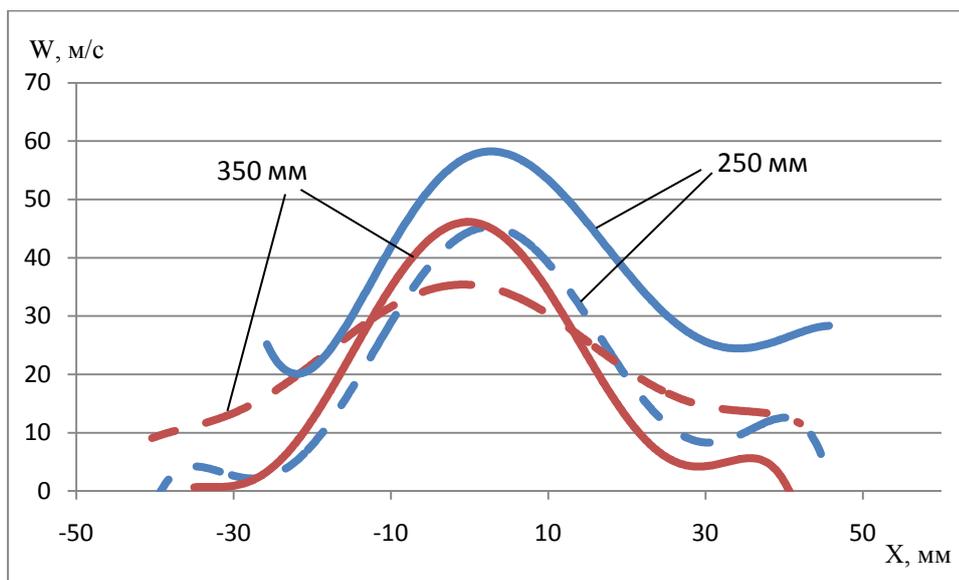


Рисунок 18. Скорости капель двухфазного потока эжекторов со смесителем с двухфазным рабочим телом (сплошные линии) и у эжектора со смесителем с однофазным рабочим телом (пунктирные линии) (подписи соответствуют расстоянию от среза эжектора)

Сравнительная оценка по результатам эксперимента на рисунке 21 показывает, что использование смесителя с двухфазным рабочим телом позволяет повысить КПД примерно на 20%.

Эжектор с двухфазным рабочим телом находит применение в гидрореактивных двигателях подводных ракет (ГРД) для увеличения тяги турбоводометных (ТВД) двигателей; в реактивных двигателях, используемых на двухсредных аппаратах; теплообменниках, использующих в своей схеме эжектор.

Существенное увеличение КПД эжектора позволяет повысить эффективность устройств, использующих эжекторы с двухфазным рабочим телом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследований, проведенных в рамках поставленных задач, получены результаты, которые позволяют:

1. Предложить новые смесительные устройства с двухфазным рабочим телом закрытого типа с газокапельной структурой течения в камере смешения смесителя, обеспечивающие формирование двухфазных струй на входе в камеру сгорания, при использовании пониженного давления топлива.

2. Для повышения эффективности реактивных двигателей, работающих в двух средах (жидкой и газообразной) и гидрореактивных двигателей предложить новое устройство формирования двухфазной газокапельной струи с высокой концентрацией конденсированной фазы на основе смесительного устройства с двухфазным рабочим телом и эжектора с двухфазным рабочим телом.

3. Впервые предложить метод решения задачи о расчете и оптимизации камеры смешения эжектора на основе решения обратной задачи.

4. Подтвердить возможность создания эффективной системы формирования двухфазной газокапельной струи с высокой концентрацией конденсированной фазы на основе эжектора без использования компрессора и диффузора в эжекторе.

5. Повысить эффективность двухсредных двигателей: реактивных и гидрореактивных за счет использования профилированного эжектора с двухфазным рабочим телом, повышающего его КПД на 15-20 %.

Список публикаций по теме диссертации

В изданиях из рекомендованного ВАК Минобрнауки России перечня:

1. Лепешинский, И.А. Смесительные устройства на основе эжектора с переменной геометрией /И.А. Лепешинский, Ю. В. Зуев, И. В. Антоновский // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2014. - № 3. – С. 33-36.
2. Лепешинский, И.А. Влияние граничных условий системы сопло-струи на распространение двухфазных газочапельных струй / И. А. Лепешинский, И. В. Антоновский, А. А. Гузенко, Ю. В. Зуев // Вестник Московского авиационного института. – 2015. - № 5. – С. 75-84.
3. Лепешинский, И.А. Оптимизация двухфазных течений с помощью решения обратной задачи / И. В. Антоновский, А. А. Гузенко, Е. А. Истомин, И. А. Лепешинский, В. А. Решетников // Известия Российской академии наук. Механика жидкости и газа. – 2016. - № 6. – С. 71-76.

Другие публикации:

4. Лепешинский, И.А. Профилирование эжектора с двухфазным рабочим телом на основе обратной задачи / И.А. Лепешинский, И.В. Антоновский, А.А. Гузенко и др. //Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВСППС'2015),24–31 мая 2015 г., Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2015. С. 481 – 483.
5. Лепешинский, И.А. Решение краевых задач двухфазных течений на основе обратной задачи / И.А. Лепешинский, И.В. Антоновский, А.А. Гузенко и др. //Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВСППС'2015),24–31 мая 2015 г., Алушта. — М.: Изд-во МАИ, 2015. С. 484 – 486.
6. Лепешинский, И.А. Профилирование эжектора с двухфазным рабочим телом на основе обратной задачи / И.А. Лепешинский, Т. В. Антоновский, А.А. Гузенко и др. //Московская молодёжная научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике - 2015». 21-23 апреля 2015 года. Москва. Сборник тезисов докладов. С. 70 – 71.
7. Лепешинский, И.А. Авиационные ГТД в системе получения дальнобойных газочапельных струй / И.А. Лепешинский, Ю.В. Зуев, Е.А. Истомин, И. В. Антоновский, А.А. Гузенко //«Климовские чтения – 2015. Перспективные направления развития двигателестроения» Сборник докладов научно-технической конференции. СПб.: Скифия-принт, 2015. С. 59-64

8. Лепешинский, И.А. Система газодинамической технологии СГТ1-60-120 на базе ГТД для получения дальнобойных газокапельных струй / И.А. Лепешинский, Ю.В. Зуев, Е.А. Истомин, И.В. Антоновский, А.А. Гузенко // Климовские чтения
9. Лепешинский, И.А. Экспериментальное исследование газодинамического смесителя закрытого типа / И.А. Лепешинский, В.А. Решетников, И. А. Заранкевич, Е.А. Истомин, И.В. Антоновский, А.А. Гузенко // Вестник СГАУ
10. Лепешинский, И.А. Эжектор с двухфазным рабочим телом и газодинамическим смесителем / И.А. Лепешинский, Ю.В. Зуев, В.А. Решетников, И.В. Антоновский, А.А. Гузенко, И.А. Заранкевич //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
11. 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
12. Антоновский, И.В. Эжектор с двухфазным рабочим телом / И.В, Антоновский, А.А. Гузенко //Гагаринские чтения – 2016: XLII Международная молодежная научная конференция: Сборник тезисов докладов; В 4 т. М.: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. С. 667 – 668.
13. Антоновский, И.В. Экспериментальное исследование газодинамического смесительного устройства закрытого типа / И.В. Антоновский, И.А. Заранкевич // 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.
14. Лепешинский, И.А. Газодинамический смеситель закрытого типа и результаты его экспериментальных исследований / И.А. Лепешинский, В.А. Решетников, И.А. Заранкевич, Е.А. Истомин, И.В. Антоновский, А.А. Гузенко //Международная научно-техническая конференция «Проблемы и перспективы развития двигателестроения»: Сборник тезисов докладов, 2016. С. 137 – 138.