

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования

**«МОСКОВСКИЙ АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ»**

(национальный исследовательский университет)

на правах рукописи

Кучеров Никита Александрович



**ФОРМИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫХ ПОТОКОВ ДЛЯ ПРОЦЕССОВ  
СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ В КАМЕРАХ СГОРАНИЯ ВРД**

Специальность 2.5.15.

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных  
аппаратов»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

научный руководитель: д.т.н. проф.  
Лепешинский Игорь Александрович

Москва 2022

Работа выполнена в Московском Авиационном институте (национальном исследовательском университете) на кафедре 201 «Теория воздушно-реактивных двигателей».

- Научный руководитель: **Лепешинский Игорь Александрович**  
Доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Теория воздушно-реактивных двигателей»
- Официальные оппоненты: **Колодяжный Дмитрий Юрьевич**  
Доктор технических наук, Федеральное  
государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский государственный  
технологический университет «СТАНКИН»,  
проректор по научной деятельности
- Стасенко Альберт Леонидович**  
Доктор технических наук, профессор,  
Центральный аэрогидродинамический  
институт имени профессора Н. Е. Жуковского  
«ЦАГИ», главный научный сотрудник
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Московский государственный  
технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский  
университет)»

Защита диссертации состоится «29» декабря 2022 года в 13:00 на заседании диссертационного совета 24.2.327.06 на базе ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт» (национальный исследовательский университет) по адресу: 125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, e-mail: mai@mai.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт» (национальный исследовательский университет)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2022 г.

Ученый секретарь совета  
д. техн. наук, доцент

В. М. Краев



## Общая характеристика работы

Представленная работа посвящена исследованию диспергирования двухфазных потоков. Существует множество устройств, работающих на двухфазном рабочем теле, таких как, например, распыливающие устройства форсажных и основных камер сгорания реактивных двигателей, сопла реактивного и ракетного двигателя, эжекторные устройства, установки для полива и орошения в сельском хозяйстве, установки для тушения пожара и т.п., поэтому для повышения эффективности данных устройств и упрощения проектирования необходимо проведение исследований в этой области.

Особенностью диспергирования двухфазных потоков является межфазное взаимодействие количеством движения и энергией, которое приводит к существенному отличию параметров диспергирования по сравнению с параметрами, получаемыми при диспергировании каждой фазы в отдельности, при одинаковых граничных условиях, причем результаты существенно зависят от структуры двухфазного потока: газок капельной или пузырьковой. Очевидно, что такие важные характеристики диспергирования как коэффициенты скорости и расхода фаз также принципиально отличаются по сравнению с однофазными рабочими телами, так что, благодаря межфазовому обмену энергией и количеством движения, их значения для каждой фазы могут превышать единицу.

Актуальность работы. Проектирование форсунок для распыления топлива в основных и форсажных камерах сгорания ВРД в значительной степени основывается на экспериментальных данных, полученных на основе диспергирования жидкости (топлива), а газовая фаза используется дополнительно для улучшения диспергирования. Имеется также ряд исследований, посвященных диспергированию пузырьковых систем. Однако, результаты, полученные различными авторами, например, по коэффициенту расхода могут существенно отличаться. Поэтому проведение исследований в области диспергирования двухфазных потоков является актуальным.

Современное состояние вопроса. На сегодняшний день существует ряд монографий и отдельных работ, в которых приводятся различные эмпирические или полуэмпирические модели для расчета дисперсных характеристик распыляемого потока жидкости, в том числе пузырьковых смесей. Однако большинство этих моделей не учитывают влияние всех определяющих процесс параметров, а наиболее совершенная из представленных моделей показала существенные погрешности при сравнении с экспериментальными данными.

Объектом исследований являются устройства диспергирования двухфазного потока.

Предметом исследований, представленных в данной диссертации является процесс диспергирования газок капельного и пузырькового двухфазного потока.

Целью работы является получение экспериментальных данных диспергирования двухфазного потока различной структуры. Разработка для двухфазного потока пузырьковой структуры корреляционной модели прогнозирования его параметров при распыле, на основе полученных экспериментальных данных.

Для этого в рамках данной работы решались следующие задачи:

- 1) Разработка конструкции устройства формирования двухфазных потоков, в том числе газокапельных струй.
- 2) Разработка методики проведения экспериментального исследования двухфазных потоков газокапельной и пузырьковой структуры.
- 3) Модернизация стенда в соответствии с требованиями методики.
- 4) Проведение экспериментального исследования и создание на его базе моделей прогнозирования параметров распыла пузырькового потока.
- 5) Разработка модели расчёта смесителя для формирования двухфазного пузырькового потока, алгоритма и его программная реализация.

Методы исследования. Для получения необходимых данных диспергирования двухфазных потоков применялись лазерно-оптические методы: PIV и теневой методы фирмы La Vision; а также метод обработки изображений, полученных в лазерном «ноже», разработанный на кафедре 201 МАИ. Подробное описание методов дано в главе 2.

Практическая ценность работы состоит в получении новых экспериментальных данных диспергирования потоков газокапельной и пузырьковой структуры и создании на этой основе корреляционного уравнения прогнозирования параметров исходного пузырькового потока при задании значения среднего диаметра Заутера, а также определения коэффициента расхода.

Научная новизна заключается в следующем:

- 1) Впервые было проведено комплексное исследование процесса распыла двухфазного потока в смесителе (карбюраторе) форсажной камеры сгорания ВРД с использованием лазерно-оптических и зондовых методов, позволившее установить газокапельную структуру потока, получить поля скоростей фаз и распределения диаметров капель в факеле распыла, а также поля статического давления и концентрации вдоль оси устройства;
- 2) На основе полученных данных удалось установить возрастающее поле статического давления вдоль оси устройства приводящее к неравномерным полям скорости и концентрации в факеле распыла, и дать рекомендации по улучшению устройства;
- 3) Коррекция моделей прогнозирования коэффициента расхода и среднего диаметра Заутера на экспериментальных данных, полученных в широком диапазоне входных параметров, значительно улучшило их точность.

Достоверность результатов исследования обеспечивается непосредственным проведением экспериментов, получением большой статистической выборки с малым шагом при изменении всех определяющих процесс распыла параметров, соблюдение методологии оценки качества при создании моделей идентификации.

На защиту выносятся:

- 1) Результаты экспериментального исследования диспергирования потока газокапельной структуры в смесителе форсажной камеры ВРД.
- 2) Результаты экспериментального исследования диспергирования потока пузырьковой структуры.
- 3) Методика расчета смесителя для формирования двухфазного пузырькового потока.
- 4) Модель прогнозирования коэффициента расхода и среднего диаметра потока Заутера пузырьковой структуры.

Апробация результатов исследования. Результаты, полученные в рамках работы над диссертацией представлялись и обсуждались на следующих конференциях: «XXII Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021). Москва, 2021.; V Международная научно-практическая конференция. Уфа, 2021; XXVII Международная научная конференция. Международная Объединенная Академия Наук. Екатеринбург, 2021; XIII Международная конференция по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020). Москва, 2020; XXI Международная конференция по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2019). 2019; XLIV Международная молодёжная научная конференция Гагаринские чтения – 2018. Москва, 2018.

Личный вклад автора. Проведение экспериментальных исследований процессов работы устройств, использующих газокапельную и пузырьковую структуру двухфазного потока. Измерение полей скоростей и размеров капель в факелах распыла лазерно-оптическими методами, а также расходов жидкости зондовым методом. Обработка результатов измерений и создание на их основе моделей прогнозирования коэффициента расхода и диаметра Заутера для пузырькового потока. Разработка модели расчёта, алгоритма и его программная реализация. Проведение численного расчёта истечения газокапельного потока из отверстия.

Публикации. Материалы диссертационной работы излагались в 9 печатных работах.

Структура и объём диссертации. Материалы диссертационной работы излагались в 9 печатных работах, из них работ, опубликованных согласно перечню российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых

степеней доктора и кандидата наук (перечень ВАК РФ) – 2, а также работ в научных изданиях, индексируемых базами Scopus и/или Web of Science – 1.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы. Работа изложена на 128 страницах машинописного текста, содержит 16 таблиц, 154 рисунка и список литературы, включающий 54 наименования.

Во введении обосновывается актуальность проблемы, приводятся наиболее важные научные и практические результаты, представленные к защите, кратко описывается структура работы.

В первой главе проводится обзор моделей прогнозирования коэффициента расхода и среднего диаметра распыла потока пузырьковой структуры, на основании которого были выбраны модели для дальнейшего рассмотрения и улучшения.

Модель прогнозирования коэффициента расхода:

$$\psi = 814 \cdot e^{\left(-0.086 \frac{l}{d}\right)} \cdot \left[ e^{\left(-2.89 \frac{P_{mix}}{P_0}\right)} + 0.496 \left(\frac{P_{mix}}{P_0}\right)^{0.161} \right] \cdot \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_г} + 11505\right)^{-1} \cdot e^{\left(\frac{0.51}{\left(\frac{1}{\Pi_1}\right) + 0.179}\right)} \quad (1)$$

Модель прогнозирования среднего диаметра Заутера:

$$d_{32} = 0.000505 \left(\frac{1}{0.12 \cdot \Pi_1}\right)^{-0.4686} \left(\frac{P_{mix}}{5 \times 10^6}\right)^{-0.1805} \left(\frac{d}{0.2}\right)^{0.6675} \left(\frac{\mu_{жс}}{0.2}\right)^{0.1714} \left(\frac{\sigma_{жс}}{46}\right)^{0.1382} \quad (2)$$

$P_{mix}$  - избыточное давление в камере смешения (перед форсункой)

$P_0$  - давление среды, в которую истекает жидкость

$\mu_{жс}$  - вязкость воды

$\mu_г$  - вязкость воздуха

$\Pi_1 = \frac{G_{жс}}{G_г}$  - отношение расхода газа к расходу жидкости

$d$  - диаметр форсунки

$l$  - длина форсунки

$\sigma_{жс}$  - поверхностное натяжение жидкости

Во второй главе описана схема экспериментального стенда и методы диагностики параметров двухфазного потока.

Назначение стенда – обеспечить получение параметров газовой фазы (воздух) и жидкостной фазы (вода) в определенных пределах значений расходов,

давлений фаз и структуры потока на входе для получения при их смешении двухфазного потока (газочапельного или пузырькового, в зависимости от массовой концентрации фаз), а также измерения скоростей и дисперсности капель на выходе. Рабочая установка условно делится на 2 тракта – гидравлический и пневматический. Схема установки представлена на рисунке 1, а общий вид установки изображен на рисунке 2.

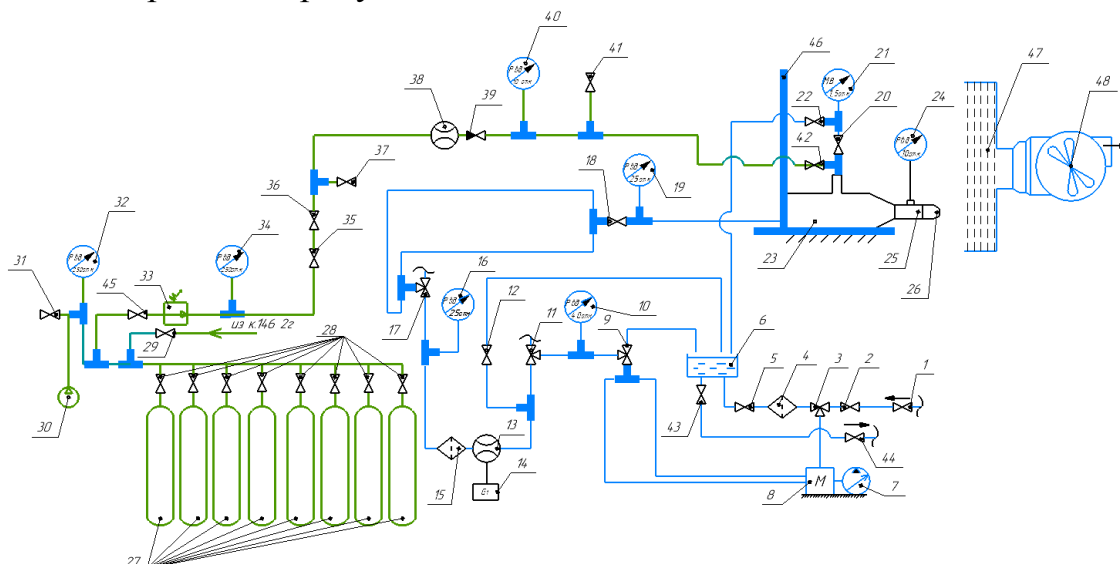


Рисунок 1. Схема установки для экспериментального исследования двухфазных течений

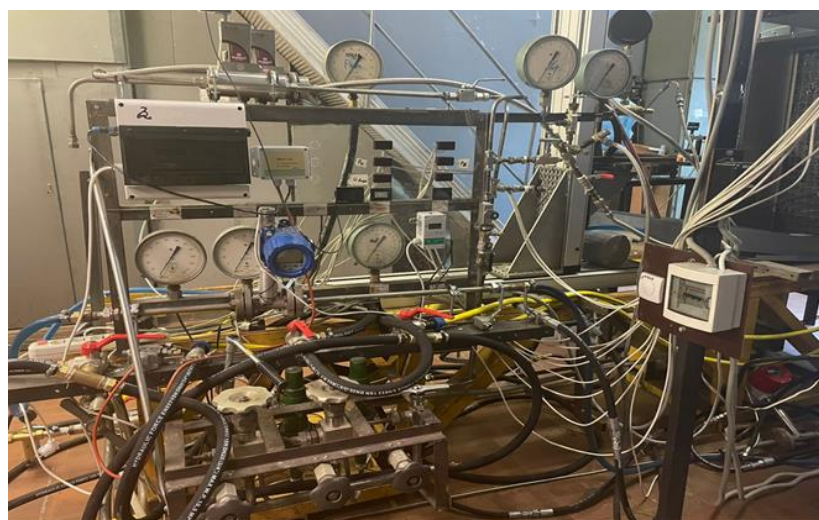


Рисунок 2. Общий вид установки

В третьей главе кратко изложены результаты экспериментального исследования смесителя форсажной камеры сгорания ВРД с газочапельной структурой потока.

Для изучения процессов, происходящих при распыливании двухфазного потока газочапельной структуры, использовалось смесительное устройство, условно называемое «карбюратор». Оно служит в качестве смесительного устройства для образования топливо-воздушной смеси в

форсажных камерах, и использует газочапельный режим для её распыливания. Конструкция этого устройства показана на рисунке 3.

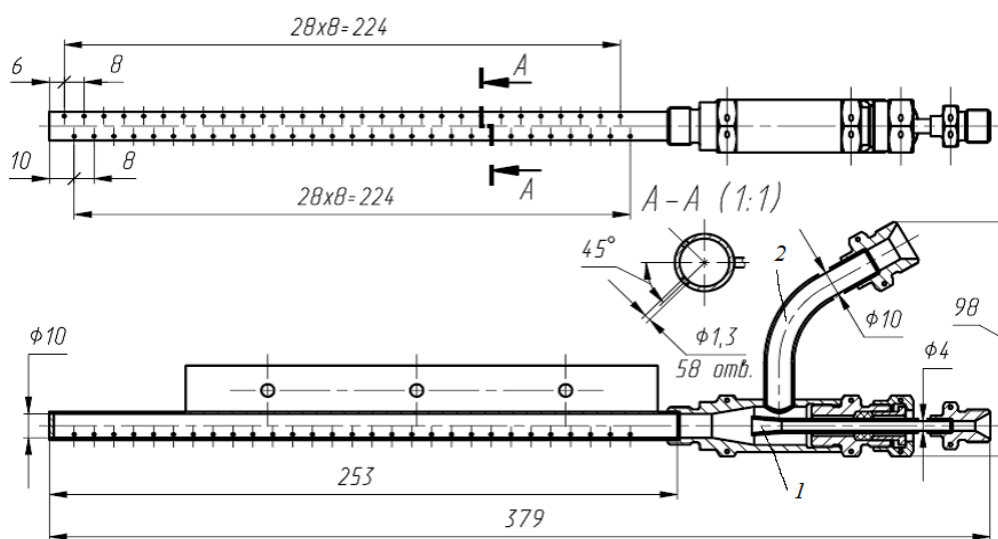


Рисунок 3. Смесительное устройство форсажной камеры сгорания (ФКС)

В смесительном устройстве для улучшения распыливания жидкости используется газовая фаза (воздух), которая одновременно поступает в смесительное устройство форсажной камеры сгорания (ФКС) вместе с жидкостью (топливом) через штуцер с внутренним диаметром 6мм, установленным перпендикулярно оси смесительного устройства форсажной камеры. Жидкость подается по оси смесительного устройства форсажной камеры после подачи воздуха (см. рис. 3) по оси карбюратора через штуцер 1 с входным отверстием для жидкости 4мм. На выходе имеется диффузорный канал с диаметром на 6 мм. Далее топливоздушная смесь попадает в цилиндрический канал с внутренним диаметром 10 мм, в котором расположены две линии отверстий диаметром 1.3 мм. Угол между плоскостями отверстий составляет 90 градусов. Вытекающая из этих струйных форсунок (отверстий) топливоздушная смесь разваливается на капли, формируя двухфазный газочапельный поток. Всего 58 форсунок.

Для рассматриваемого смесителя снималась зависимость расхода жидкости от давления при различных расходах воздуха (характеристика смесителя с двухфазным рабочим телом), представленная на рисунке 4. Параметры жидкости в данной конструкции практически зависят только от давления жидкости, и не зависят от расхода газа. Для оценки влияния расхода жидкости на работу смесителя он исследовался на различных режимах, данные о которых представлены в таблице 1, где  $P$  обозначает давление,  $G$  расходы фаз, индексы «в»-воздух, «ж»-жидкость, «к»-параметр в конце камеры смесителя. Смеситель располагался вертикально, рабочие тела подавались снизу. Поля скоростей капель жидкости измерялись PIV методом на основе обработки двухэкспозиционного изображения потока частиц, и получения корреляционной функции. На рисунках 5 и 6 представлены поверхности, построенные по кривым профилей



горизонтальных проекций скоростей каплей жидкости  $U_k$  в различных поперечных сечениях струи на режимах №2 и №3. За счёт совместного использования зондового и PIV-методов удалось получить профили концентрации и скоростного напора (рисунки 7 и 8).

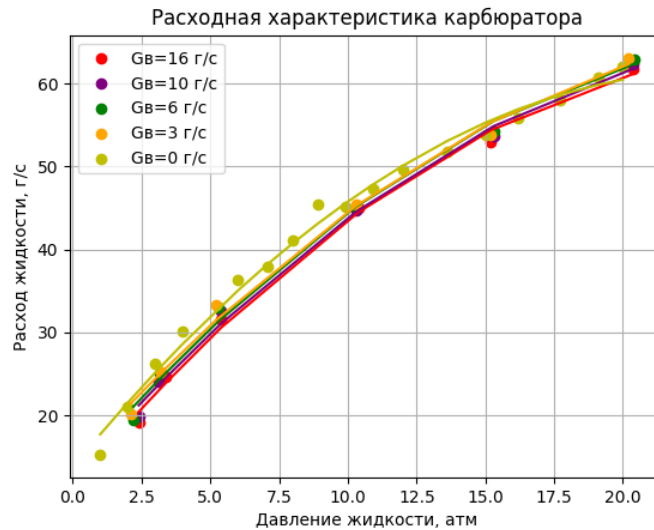


Рисунок 4. Расходная характеристика объекта - зависимость расхода жидкости  $G_{\text{ж}}$  от давления жидкости  $P_{\text{ж}}$  при постоянных значениях расхода воздуха  $G_{\text{в}}$

Таблица 1 Режимы исследования

№ режима	$P_{\text{ж}}$ кгс/см <sup>2</sup>	$G_{\text{ж}}$ мА	$G_{\text{ж}}$ г/с	$P_{\text{к}}$ кгс/см <sup>2</sup>	$P_{\text{в}}$ кгс/см <sup>2</sup>	$G_{\text{в}}$ г/с
0	0,1	4,36	0	-0,09	0	0
1	3,2	6,31	21,34	0,28	10	12,25
		6,35	21,66			12,27
2	5,3	7,38	29,0	0,29	10	12,10
		7,84	31,75			12,13
3	5,3	7,3	28,5	0,63	14,5	16,79
		7,6	31,75			16,88
4	10,4	10,5	28,49	0,36	10	12,22
		10,8	30,35			12,50
5	15,3	13,33	43,48	0,42	10	12,17
		13,48	44,51			12,40
6	0,1	4,05	-2,72	-0,10	0	0,06

Изменение профиля проекции скорости U по длине струи  
на режиме №2

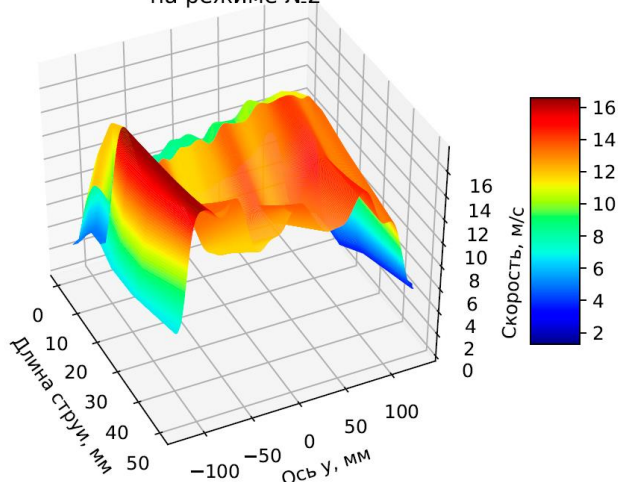


Рисунок 5. Изменение осреднённого профиля осевых проекций скорости капель U по длине струи на режиме 2 (таблица 1)

Изменение профиля проекции скорости U по длине струи  
на режиме №3

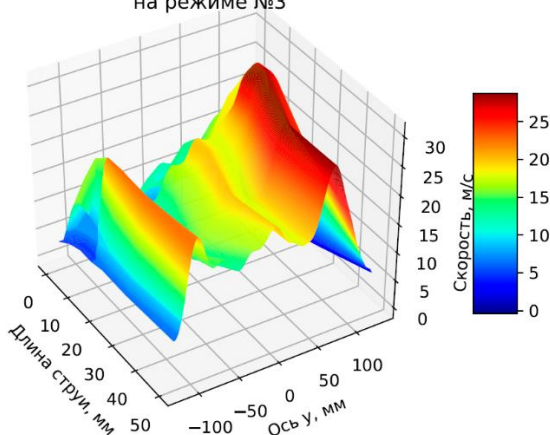


Рисунок 6. Изменение осреднённого профиля осевых проекций скорости капель U по длине струи на режиме 3 (таблица 1)

На режимах 2 и 3 (рис. 5 и 6) наблюдаются неравномерные поля с максимумами в области крайних форсунок, а также провал в центральной части, причем после максимума внизу скорость увеличивается. На режиме 3 (рис. 6) наибольший максимум появляется в области последних форсунок, при этом существенно увеличивается скорость. Это связано с повышением расхода воздуха, и как следствие, давления в торцевой части в конце канала, и подтверждается измерением давления в верхней торцевой части смесителя.

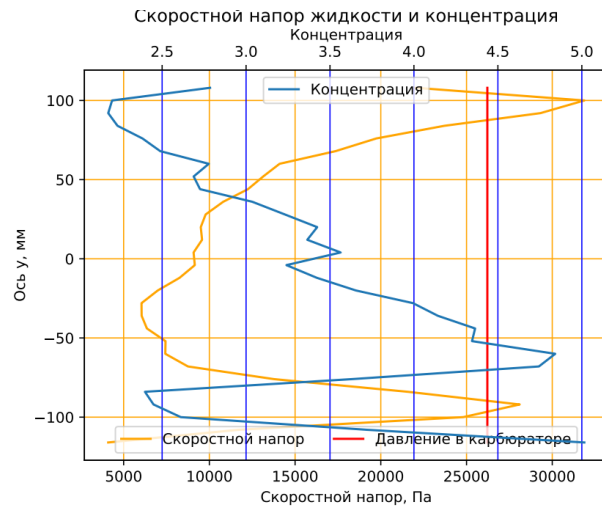


Рисунок 7. Профили скоростного напора жидкости и концентрации на режиме №2.

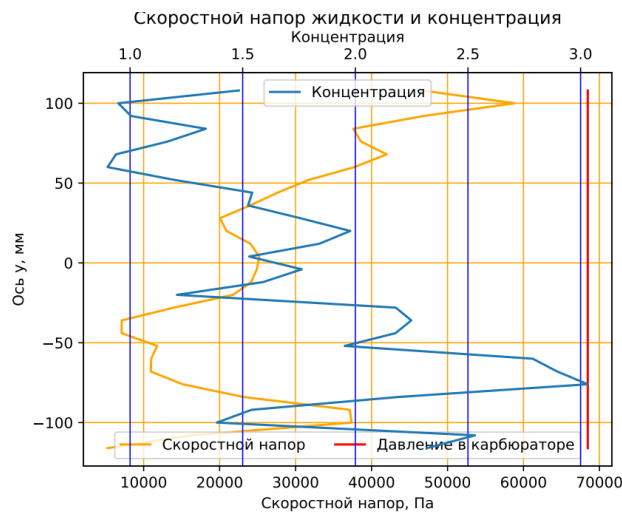


Рисунок 8. Профили скоростного напора жидкости и концентрации на режиме №3.

Сравнивая графики скоростного напора на режимах 2 и 3 видно, что кривая скоростного напора на режиме 3 более «зубчатая», что можно объяснить более плавным изменением статического давления на режиме 2. Также можно заметить некоторую симметрию у кривых концентрации и статического давления. То есть при росте концентрации воды статическое давление падает и наоборот. Таким образом можно сделать вывод о том, что воздух, движущийся вдоль канала карбюратора испытывает на себе два воздействия: расходное, за счёт истечения воздуха из отверстий, и геометрическое, за счёт переменной концентрации жидкой фазы. Из этого следует, что правильное профилирование канала эжектора и способ подачи компонентов смеси позволят получить требуемые поля скорости и концентрации в факеле распыла.

Таким образом, в результате эксперимента впервые получены все необходимые параметры распыленного газочапельного потока, на основе которых удалось сделать выводы о работе устройства и сформулировать рекомендации для его улучшения.

Дисперсность капель оценивалась на примере измерения параметров распыла на двух последних форсунках (расположенных в конце канала), обозначенных номерами №28 и №29. Для оценки использовалась аппроксимация распределением Розен-Раммлера, которое характеризуется частотной кривой (3) и суммарной или интегральной кривой (4).

$$\text{Частотная кривая} \quad y = \frac{n}{\bar{d}^n} d^{n-1} e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n} \quad (3)$$

$$\text{Суммарная или интегральная кривая} \quad V = 1 - e^{-\left(\frac{d}{\bar{d}}\right)^n} \quad (4)$$

Здесь  $d$  – диаметр капель в спектре распыливания,  $\bar{d}$  – константа размера,  $n$  – константа распределения. Значения параметров распределения Розен-Раммлера представлены в таблице 2.

Таблица 2

Константа	Режим №2		Режим №3	
	Форсунка 28	Форсунка 29	Форсунка 28	Форсунка 29
размера	68 мкм	56 мкм	44 мкм	54 мкм
распределения	1.6	1.3	1.1	1.3

Как видно из таблицы 2, форсунка 29 практически не реагирует на изменение концентрации, а форсунка 28 снижает размер капель и дисперсию, что объясняется как неравномерным распределением статического давления внутри смесителя, местом расположения форсунки и режимом работы устройства.

В четвёртой главе изложены результаты экспериментального исследования потока пузырьковой структуры и улучшены выбранные ранее модели расчета коэффициента расхода (1) и среднего диаметра Заутера (2).

Схема проведения экспериментов представлена на рисунке 9. К исследуемому объекту подводятся рабочие тела (вода и воздух) с замером их параметров (расхода и давления). Так же производится замер статического давления перед форсунками, что позволяет рассчитать объемную концентрацию  $\alpha$  каждой фазы. Параметры факела распыла на выходе измеряются лазерно-оптическими методами. Параметры применяемых форсунок приведены в таблице 3.

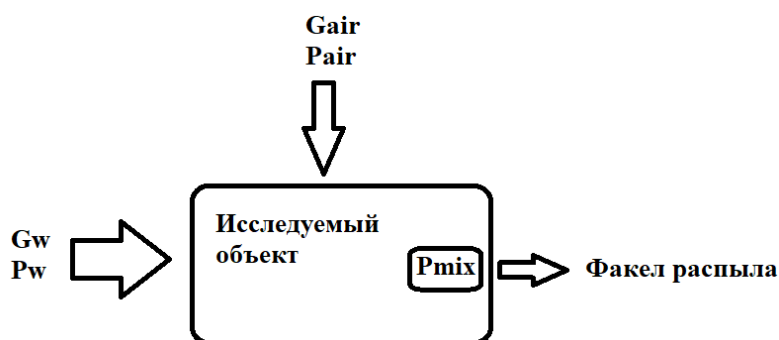






Рисунок 9. Схема проведения экспериментов

Таблица 3. Форсунки

Форсунка	Диаметр отверстий, мм	Площадь форсунок, $\text{м}^2 \cdot 10^{-5}$	Внешний вид
А	8x2.0, 1x1.8	2.77	
В	6x2.5, 1x2.3	3.26	
С	6x2, 1x1.8	2.19	
Д	7x3	4.24	
Е	8x2.8, 1x2.1	5.27	

Основной целью проведения экспериментов является создание на основе полученных данных, моделей для определения коэффициента расхода и среднего диаметра Заутера пузырькового потока. Для этого рассмотрим таблицу корреляций параметров.

Таблица 4. Корреляции

	$G_{ж}$	$G_{г}$	$P_{mix}$	$G_{г}/G_{ж}$	alfa_air	d	ro_mid	w_nozzle_t	$\Psi$	$\Psi_{cp}$	$\Psi_{жс}$
$G_{ж}$	1.000000	0.320263	0.523922	-0.049579	-0.279238	0.498617	0.280478	0.493050	-0.060322	-0.189637	0.068174
$G_{г}$	0.320263	1.000000	0.278790	0.893573	0.625806	0.170760	-0.623419	0.433149	-0.053828	0.242375	-0.320792
$P_{mix}$	0.523922	0.278790	1.000000	0.111663	-0.295613	-0.365585	0.298194	0.971532	-0.173669	-0.307315	-0.021944
$G_{г}/G_{ж}$	-0.049579	0.893573	0.111663	1.000000	0.840055	-0.015300	-0.838136	0.299672	-0.074436	0.329392	-0.435104
alfa_air	-0.279238	0.625806	-0.295613	0.840055	1.000000	0.127651	-0.999993	-0.118787	-0.049128	0.437124	-0.486514
d	0.498617	0.170760	-0.365585	-0.015300	0.127651	1.000000	-0.128610	-0.369836	-0.175162	-0.088132	-0.211172
ro_mid	0.280478	-0.623419	0.298194	-0.838136	-0.999993	-0.128610	1.000000	0.121615	0.048931	-0.437383	0.486357
w_nozzle_t	0.493050	0.433149	0.971532	0.299672	-0.118787	-0.369836	0.121615	1.000000	-0.168918	-0.220179	-0.095581
$\Psi$	-0.060322	-0.053828	-0.173669	-0.074436	-0.049128	-0.175162	0.048931	-0.168918	1.000000	0.874610	0.895310
$\Psi_{cp}$	-0.189637	0.242375	-0.307315	0.329392	0.437124	-0.088132	-0.437383	-0.220179	0.874610	1.000000	0.567641
$\Psi_{жс}$	0.068174	-0.320792	-0.021944	-0.435104	-0.486514	-0.211172	0.486357	-0.095581	0.895310	0.567641	1.000000

Здесь,  $G_{жс}$  -расход воды,  $G_{г}$  -расход воздуха,  $P_{mix}$  - избыточное давление перед форсункой,  $\frac{1}{\Pi_1} = \frac{G_{г}}{G_{жс}}$  -соотношение расходов,  $\alpha_2$  (alfa\_air) -объёмная доля воздуха,

$d$  -диаметр форсунки,  $\rho_{cp}$  (ro\_mid)-средняя плотность,  $w_{nozzle\_t} = \sqrt{\frac{2P_{mix}}{\rho_{cp}}}$  -

теоретическая, скорость истечения пузырьковой смеси,  $P_{mix}$  - давление потока перед форсункой. В таблице также приведены коэффициенты расхода, определяемые следующим образом.

Формула  $\psi$  коэффициента расхода:

$$\psi = \frac{G_{жс}}{\rho_{ср} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{ср}}} \cdot F}, \quad (5)$$

где  $G_{жс}$  - расход воды [кг/с],  $\rho_{ср}$  - средняя плотность [кг/м<sup>3</sup>],  $\Delta P$  - перепад давления [Па],  $F$  - площадь [м<sup>2</sup>].

Коэффициент расхода  $\psi_{ср}$ , где скорость рассчитана по средней плотности

$$\psi_{ср} = \frac{G_{жс}}{\rho_{ср} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{жс}}} \cdot F}, \quad \text{где } \rho_{жс} - \text{плотность воды.} \quad (6)$$

Коэффициент расхода, где скорость рассчитана по плотности жидкости:

$$\psi_{жс} = \frac{G_{жс}}{\rho_{жс} \cdot \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_{жс}}} \cdot F}. \quad (7)$$

Свяжем эти величины через среднюю плотность:

$$\rho_{ср} = \alpha_2 \cdot \rho_2 + (1 - \alpha_2) \cdot \rho_{жс}, \quad (8)$$

где  $\alpha_2$  - объёмная доля воздуха,  $\rho_2$  - плотность воздуха. Преобразуем (8) как

$$\frac{\rho_{ср}}{\rho_{жс}} = \frac{\alpha_2 \cdot \rho_2}{\rho_{жс}} + (1 - \alpha_2), \quad \text{ввиду того что } \frac{\alpha_2 \cdot \rho_2}{\rho_{жс}} \ll (1 - \alpha_2) \quad \text{можно записать что } \frac{\rho_{ср}}{\rho_{жс}} = (1 - \alpha_2)$$

, тогда получим связи  $\psi_{ср} = \frac{\psi_{жс}}{(1 - \alpha_2)}$  и  $\psi = \frac{\psi_{жс}}{\sqrt{(1 - \alpha_2)}}$ . Таким образом достаточно

иметь модель прогнозирования любого из данных коэффициентов.

Далее на основе полученных данных была рассчитана погрешность прогнозирования выбранных ранее моделей. Средняя ошибка модели (1) составила 13.7%, а модели (2) 44.3%. Для улучшения качества прогнозирования модели были переобучены на экспериментальных данных, с использованием различных поисковых методов. Результаты представлены на рисунках 10 и 11.

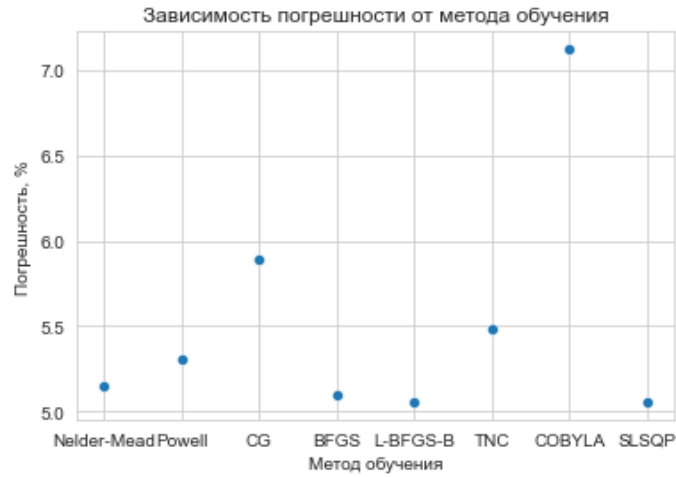


Рисунок 10. Зависимости погрешности модели прогнозирования коэффициента расхода (1) от метода обучения

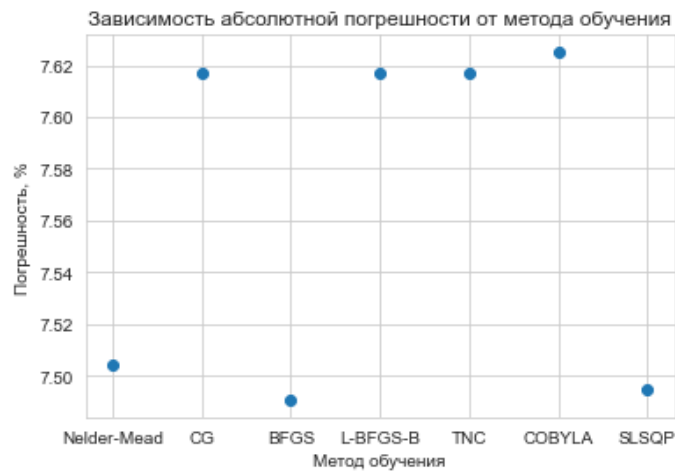


Рисунок 11. Зависимости погрешности модели прогнозирования диаметра Заутера (2) от метода обучения

Из рисунков 10 и 11 видно, что погрешность модели (1) удалось снизить до 5%, а модели (2) до 7.3%. Уравнения переобученных моделей имеют вид:

$$\psi = 814e^{\left(-0.49\frac{l}{d}\right)} \cdot \left[ e^{\left(-3\frac{P_{mix}}{P_0}\right)} + 2 \cdot \left(\frac{P_{mix}}{P_0}\right)^{-0.07} \right] \cdot \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_г} + 11505\right)^{-1} \cdot e^{\left(\frac{1.49}{\left(\frac{1}{\Pi_1}\right)^{+0.695}}\right)} \quad (1^*)$$

$$d_{32} = 505 \cdot \left(\frac{\left(\frac{1}{\Pi_1}\right)}{0.165}\right)^{-0.061} \cdot \left(\frac{P_{mix}}{5 \cdot 10^5}\right)^{-0.227} \cdot \left(\frac{d}{0.225}\right)^{1.26} \cdot \left(\frac{\mu}{1.1528}\right)^{-0.23} \cdot \left(\frac{\sigma}{46000}\right)^{-0.069} \quad (2^*)$$

Далее рассмотрим интегральные распределения погрешностей.

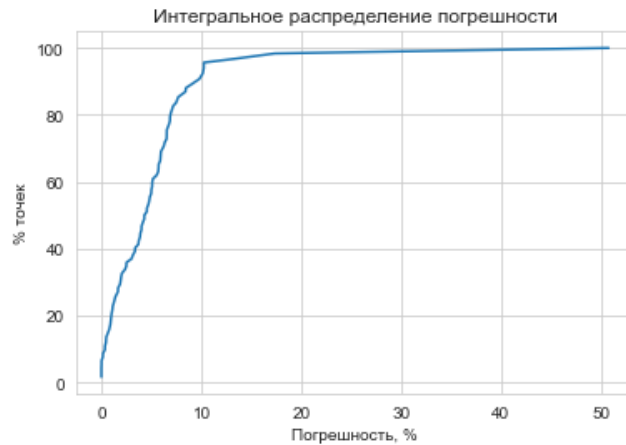


Рисунок 12. Интегральное распределение погрешности модели (1\*)



Рисунок 13. Интегральное распределение погрешности модели (2\*)

Как видно из рисунка 12, что 95 % всех точек переобученной модели (1\*) имеют погрешность менее 10%. А из рисунка 13 около 80 % точек переобученной модели (2\*) имеют погрешности менее 10%. Из этого можно сделать о возможности применения этих моделей.

Таким образом, благодаря наличию регрессионных уравнений связывающих коэффициент расхода и диаметр Заутера с входными параметрами, можно решать обратную задачу расчета диспергирования двухфазного пузырькового потока.

В пятой главе представлена методика расчёта двухфазного пузырькового смесителя.

Рассматриваемая методика направлена на получение геометрии устройства, обеспечивающего формирование и распыл пузырьковой водо-воздушной смеси.

Смеситель (рис.14) состоит из следующих элементов: входного конфузора (поз.1) обеспечивающего снижение давления воды до необходимого значения и аэратора (поз. 2) (в случае если давление аэраторе меньше атмосферного смеситель работает на режиме эжекции), диффузора (поз. 4) поднимающем давление воды, смесителя с блоком форсунок (поз. 5), производящего распыл смеси через форсунки (поз.6). Методика расчёта смесителя была программно



реализована на языках С# и Python 3. Интерфейс программы представлен на рисунке 15.

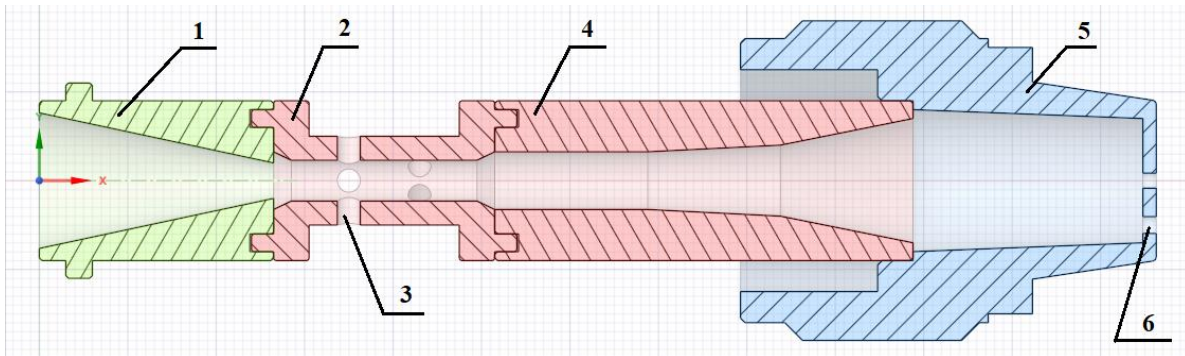


Рисунок 14. Смеситель

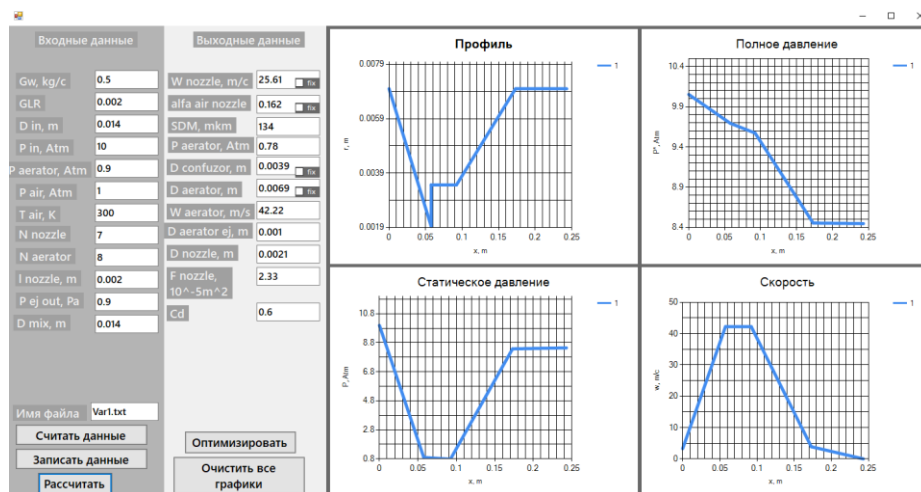


Рисунок 14. Интерфейс программы расчёта геометрии смесителя

### Заключение и выводы

1. В данной работе впервые в результате эксперимента получены данные работе двухфазного смесительного устройства форсажной камеры ВРД, что позволило выявить проблемы в его работе и сформулировать рекомендации для их решения.
2. На основе полученного статистического материала, полученного при исследовании диспергирования пузырькового потока, удалось создать корреляционные модели, связывающие режимные параметры на входе в смеситель с дисперсными характеристиками на выходе из него. Что позволило разработать и программно реализовать методику решения обратной задачи определения входных параметров и коэффициента расхода форсунок смесителя при задании среднего диаметра Заутера.

3. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании различных распыливающих устройств в камерах сгорания реактивных двигателей и в других устройствах использующих двухфазные потоки: соплах и эжекторах, различных смесительных устройствах и др.

#### Библиографический список работ по теме диссертации

1. Марчуков Е.Ю., Мухин А.Н., Лепешинский И.А., Решетников В.А., Кучеров Н.А. Экспериментальное исследование смесительного устройства форсажной камеры газотурбинного двигателя // Изв. РАН. МЖГ. 2022. № 4. С. 3-10.
2. Лепешинский И.А., Кучеров Н.А., Решетников В.А., Зотикова П.В. Оптимизация профиля сопла с двухфазным рабочим телом // В сборнике: Материалы XXII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021). Материалы конференции. Москва, 2021. С. 408-410.
3. Зуев Ю.В., Кучеров Н.А., Зотикова П.В. Влияние граничных условий на длину начального участка и дальность двухфазной газокапельной струи // В сборнике: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ И ПРИКЛАДНЫЕ НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ: ИННОВАТИКА В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ. Сборник научных статей по материалам V Международной научно-практической конференции. Уфа, 2021. С. 62-67.
4. Лепешинский И.А., Решетников В.А., Кучеров Н.А., Зотикова П.В. Метод расчета эжектора с двухфазным рабочим телом // В сборнике: НАУКА РОССИИ: ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ. Сборник научных трудов по материалам XXVII международной научной конференции. Международная Объединенная Академия Наук. Екатеринбург, 2021. С. 99-101.
5. Лепешинский И.А., Решетников В.А., Кучеров Н.А., Зотикова П.В. Многофорсуночный смеситель с двухфазным рабочим телом // Насосы. Турбины. Системы. 2021. № 1 (38). С. 5-11.
6. Лепешинский И.А., Решетников В.А., Кучеров Н.А., Зотикова П.В. Оценка способов формирования двухфазной газокапельной струи // В сборнике: Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020). Москва, 2020. С. 165-166.
7. Лепешинский И.А., Ципенко А.В., Решетников В.А., Кучеров Н.А., Пахомов А.К., Ся С. Возможности измерения параметров двухфазного высококонцентрированного потока при совместном использовании лазерно-оптических и зондовых методов // В сборнике: Материалы XXI Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2019). Материалы конференции. 2019. С. 499-500.

8. Лепешинский И.А., Ципенко А.В., Решетников В.А., Кучеров Н.А., Ся С. Совместное измерение газодинамических параметров двухфазных высококонцентрированных потоков лазерно-оптическими и зондовыми методами // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 3. С. 152-160.
9. Кучеров Н.А. Экспериментальное исследование смесительного устройства // В книге: Гагаринские чтения - 2018. Сборник тезисов докладов XLIV Международной молодёжной научной конференции. 2018. С. 131.