

На правах рукописи

ИСТОМИН ЕВГЕНИЙ АНДРЕЕВИЧ

АВИАЦИОННЫЙ ГТД В СИСТЕМЕ ПОЖАРОТУШЕНИЯ БОЛЬШОЙ  
МОЩНОСТИ И ДАЛЬНОСТИ ДЕЙСТВИЯ

Специальность 05.07.05

«Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных  
аппаратов»

Автореферат  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Москва – 2012

Работа выполнена в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете)

Научный руководитель: д.т.н., профессор Лепешинский Игорь Александрович

Официальные оппоненты:

Махров Владислав Петрович – д.т.н., профессор, Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), профессор кафедры «Проектирование аэрогидрокосмических систем»;

Чабанов Владимир Александрович – к.т.н., ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем», начальник подразделения.

Ведущая организация: Научно-технический центр им. А.Люльки НПО "Сатурн"

Защита диссертации состоится « 17 » декабря 2012 года в 13.00 на заседании диссертационного совета Д212.125.08, созданного на базе Московского авиационного института (национального исследовательского университета) по адресу 125993, г . Москва, А -80, ГСП-3, Волоколамское ш., д.4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института (национального исследовательского университета)

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_2012г

Ученый секретарь диссертационного совета Д212.125.08,  
д.т.н., профессор

Ю. В. Зуев

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

В городах ежедневно происходит большое количество пожаров различной сложности, периодически случаются крупные пожары, для тушения которых требуется длительное время. Пожары являются причиной большого материального ущерба и человеческих жертв, причем часто ущерб от процесса тушения может превышать ущерб от пожара из-за длительного тушения и заливания водой объектов вне очага пожара. Кроме этого в атмосферу выбрасывается большое количество вредных веществ-продуктов сгорания:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$ , сажи и других веществ, оказывающих неблагоприятное воздействие на людей, здания и технические сооружения. Продукты сгорания крупных пожаров приводят к ухудшению экологической обстановки не только в районе пожара, но и во всем регионе.

Наиболее опасны пожары на нефтеперерабатывающих заводах, бензозаправочных станциях, нефтехранилищах, на предприятиях, производящих экологически опасную продукцию, поскольку сегодня практически отсутствуют соответствующие системы пожаротушения, обеспечивающие большую дальность действия. Такие пожары обладают высокой интенсивностью излучения, что делает практически невозможным приближение к ним существующих средств. Отсутствует возможность тушения сильных очагов пожаров в высотных зданиях и лесных массивов (Рис.1).



Рис.1

В МАИ разработана новая технология получения пожаротушащих струй и создан ряд систем ее реализующих под общим названием газодинамические управляемые дисперсные пожарные системы. Эта технология и разрабатываемые на ее основе системы позволяют успешно решать все вышерассмотренные проблемы пожаротушения.

Существо созданной технологии заключается в формировании высокоскоростных газокapельных струй, содержащих мелкодисперсные капли жидкости, а в качестве рабочего газа - воздух. Принципиальная схема системы реализующей новую технологию показана на Рис.2. Источник сжатого воздуха 1 с давлением до 15 [атм]. и расходом до  $10 \left[ \frac{\text{êã}}{\text{ñ}} \right]$ , источник жидкости 2 с давлением до 15 атм. и расходом до  $300 \left[ \frac{\text{êã}}{\text{ñ}} \right]$  подают свои рабочие тела в камеру смешения 3, где происходит дробление жидкости на капли заданного размера. Полученная двухфазная газокapельная смесь направляется в сопло 4, где разгоняется до высокой скорости. На выходе образуется высокоскоростная газокapельная струя 5. Получение рабочих тел с такими параметрами требует огромных затрат мощности, поэтому данная технология может быть реализована только на базе ГТД.

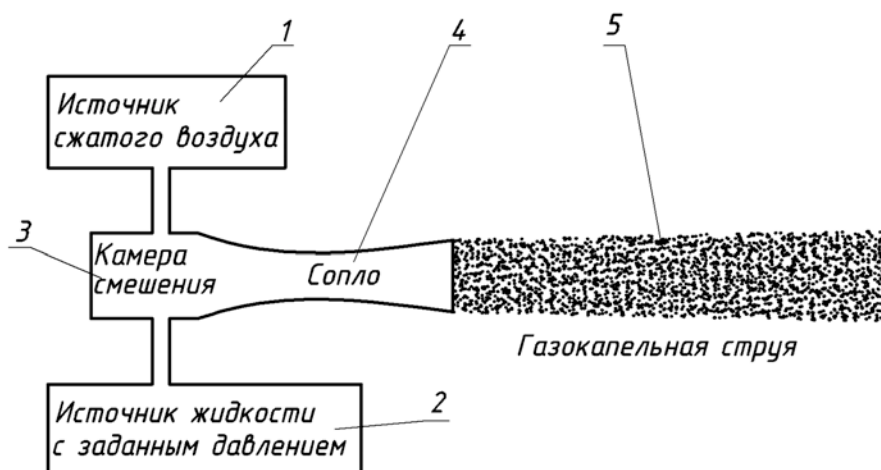


Рис.2 Принципиальная схема системы пожаротушения

Система пожаротушения большой мощности и дальности может обеспечить дальность действия струи порядка 150-300 м., поэтому может использоваться для тушения пожаров с высокой интенсивностью излучения, т.е. там, где невозможно приблизиться к объекту, например в высотных зданиях, на топливных складах и т.д.

### Цель и задачи работы

Настоящая работа посвящена исследованию установки пожаротушения большой мощности, где в качестве источника мощности рассматривается авиационный газотурбинный двигатель со свободной турбиной.

В работе необходимо было решить следующие задачи:

1. сформулировать рекомендации по выбору оптимального сопла и струи с двухфазным воздушно-водяным рабочим телом, и произвести её расчет;

2. сформулировать концепцию и провести исследование смесительного устройства, использующего волновую структуру сверхзвукового двухфазного потока (наличие критических режимов), обеспечивающее качественное смесеобразование для устойчивой работы сопла в широком диапазоне входных параметров и максимальную дальность струи;

3. экспериментально подтвердить возможность создания системы пожаротушения большой мощности и дальности действия на основе разработанных в работе рекомендаций;

4. сформулировать рекомендации по выбору схем ГТД на базе конкретных отечественных авиационных двигателей для создания систем пожаротушения большой мощности и дальности действия;

5. провести работу по согласованию совместной работы основных элементов системы (ГТД, сопло с двухфазным рабочим телом, камера смешения, струи, насосы, вспомогательный компрессор, теплообменники).

6. создание математических моделей расчета: СПБМиДД, струи, сопла, смесителя, камеры смешения.

### **Научная новизна работы**

Данная работа посвящена решению специфической задаче : исследование работы ГТД в системе пожаротушения большой мощности и дальности действия. Эта работа является продолжением работы Кирдсук Сакулты «ГТД как источник рабочего тела и мощности для системы пожаротушения большой мощности и дальности действия», рассматривающая схему с отбором рабочего тела между ступенями турбины газогенератора и свободной турбины. В нашем случае рассматривались ГТД как источники мощности для привода вспомогательных агрегатов (вспомогательного компрессора, насосов). Новизна работы заключается в следующем:

- Разработана математическая модель расчета различных схем использования авиационного ГТД в системах пожаротушения большой мощности. На базе расчетов были сформулированы рекомендации по выбору схемы с точки зрения получения максимальной эффективности на различных режимах работы.

- Проведено экспериментальное исследование режимов работы смесительного устройства, использующего волновую структуру сверхзвукового двухфазного потока. Структура сверхзвукового двухфазного потока с высокой концентрацией капель до сих пор малоизученна.

- Впервые была получена высокоскоростная, высококонцентрированная двухфазная струя с расходом жидкой фазы 50 кг /с и дальностью 140м, подтвердившая правильность математической модели расчета предложенной для расчета Ю. В. Зуевым и И. А. Лепешинским.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность полученных результатов подтверждалась результатами экспериментов и сравнениями с результатами других авторов.

### **Практическая ценность результатов**

Разработанные математические модели, алгоритмы, программы, а также результаты теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы для создания систем пожаротушения большой мощности и дальности действия.

Дополнив и расширив результаты экспериментов со смесительным устройством можно использовать для проектирования топливных форсунок основной камеры сгорания ГТД.

### **Реализация и внедрение результатов работы**

Основные научные результаты, полученные в диссертационной работе, нашли применение при создании опытной установки по формированию газокапельной двухфазной струи с расходом жидкой фазы 50 кг/с, а также для проведения прикладных исследовательских работ по газокапельным течениям в научно-исследовательской группе на базе стенда созданного в лаборатории кафедры 201 МАИ.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

Тепловой расчет ГТД как источник мощности в различных схемах системы пожаротушения большой мощности.

Результаты теоретического и экспериментального исследования сопла с двухфазным рабочем телом.

Результаты теоретического и экспериментального исследования двухфазных струй.

### **Апробация результатов работы**

Результаты выполненных исследований докладывались и получили положительную оценку на аспирантских и газодинамических семинарах кафедры “Теории воздушно - реактивных двигателей” МАИ, а также на XIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели», Москва, 2008 г; на открытой конференции в Национальной Академии прикладных наук России,

Москва, 2009 г.; на конференции в Военной академии Генштаба ВС РФ, Москва, 2010г.

### **Публикации**

По основным результатам, выполненным в диссертации исследований, опубликовано 4 научные статьи и 1 тезис доклада.

### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа изложена на 159 машинописных страницах и состоит из введения, 5 глав, заключения и списка использованных источников. Иллюстрационный материал представлен в виде 90 рисунков и 10 таблиц. Список использованных источников включает в себя 78 наименований на 6 страницах.

### **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

К настоящему времени известно несколько работ рассматривающих газотурбинный двигатель как источник мощности и газового рабочего тела в системах пожаротушения большой мощности и дальности действия, а также несколько работ, статей и монографий, посвящённых исследованию многофазных течений с высокой (более 5) массовой концентрацией дисперсной фазы в газе.

#### *Введение*

Во введении обоснованна актуальность темы диссертации «Авиационный ГТД в системе пожаротушения большой мощности и дальности действия», сформулирована цель и задачи исследования, показана научная новизна.

#### *Первая глава*

В первой главе на базе математической модели предложенной Ю. В. Зуевым, И. А. Лепешинским было проведено численное исследование и анализ двухфазных струй.

Была получена зависимость дальности струи от размера капель (см. Рис. 3). Анализ данной зависимости показывает, что максимальная дальность струи практически не изменяется с размером капель более 100 мкм. Ожидаемая дальность струи с расходом жидкой фазы  $G_{ж}=50$  кг/с. составляет 150 м., а с  $G_{ж}=150$  кг/с до 260 м.

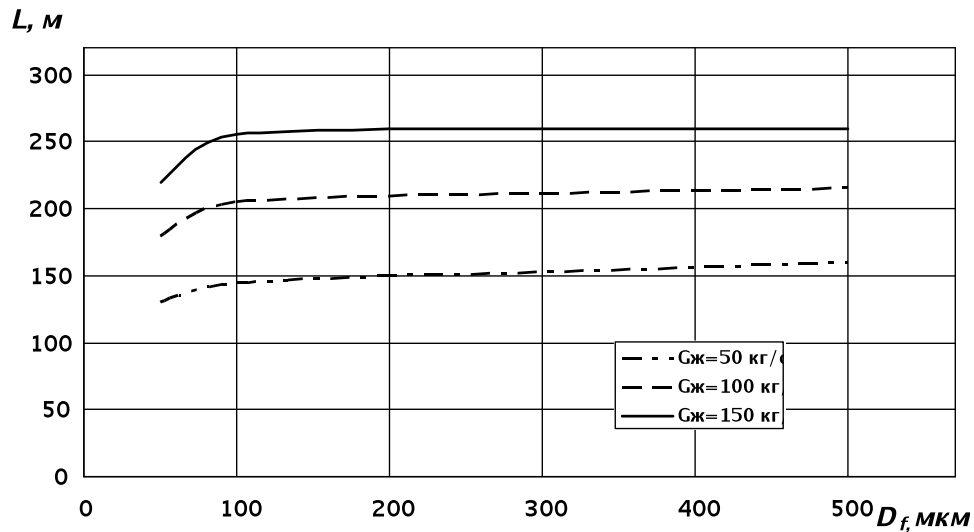


Рис. 3 Зависимость дальности струи от размера капель.

На Рис. 4 показано, что относительный радиус струи по половинной скорости и относительная скорость жидкой фазы на оси струи не зависит от входного давления. Отсюда можно сделать вывод, что безразмерные профили подобны.

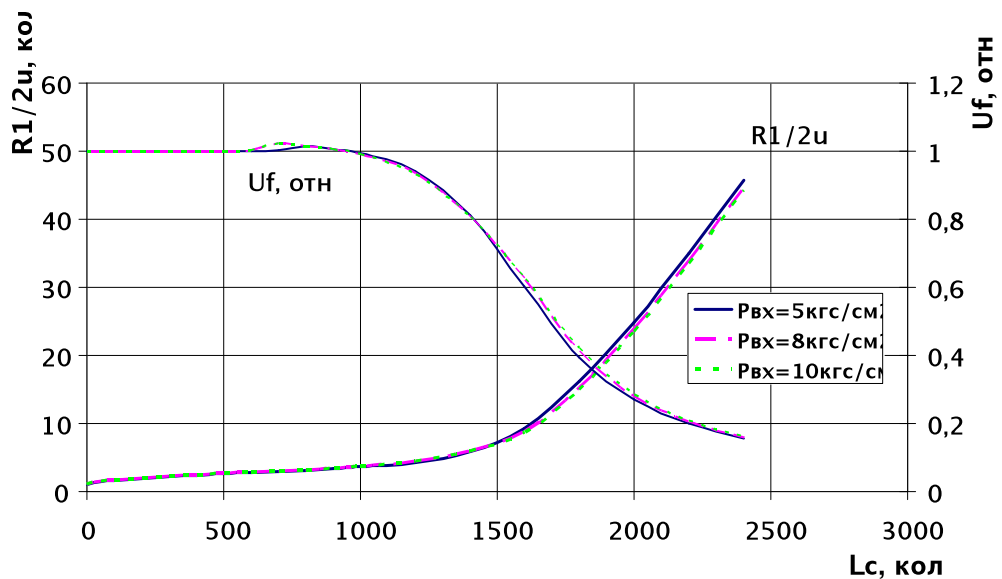


Рис. 4 Зависимость относительного радиуса и скорости от относительной длины двухфазной струи.

В работе Лепешинского И.А., Зуева Ю.В., Воронежского А.В. показано, что максимальная дальность двухфазной струи может быть реализована в диапазоне концентраций жидкости порядка  $\Pi_1=40$ .

Пользуясь полученными зависимостями, и зная необходимые параметры системы в целом, мы определяем потребные расходы жидкости и газа, скорости истечения из сопла и требуемую дисперсность. Располагая такими данными можно приступить к профилированию сопла, проектированию смесительного устройства, подбору силовой установки и схемы реализации системы.

## *Вторая глава*

Вторая глава посвящена изучению и расчету сопел с двухфазным рабочим телом. Двухфазные рабочие тела используются в целом ряде аппаратов и энергетических устройств, таких как реактивные двигатели, газоструйные насосы, теплообменники, МГД генераторы на твердом топливе и жидком металле и т.д. Одним из основных элементов таких устройств является сопло, в котором внутренняя и потенциальная энергия давления преобразуется в кинетическую энергию двухфазного потока.

Вопросы течения двухфазных сред с большой концентрацией конденсированной фазы как теоретическом, так и в экспериментальном плане исследованы недостаточно. В частности, слабо исследованы вопросы течения с коагуляцией и дроблением капель в соплах, течение пленки, формирование полей параметров таких как дисперсность, концентрация, скорости, температуры фаз.

В данной части представлены результаты теоретического исследования двухфазного течения двухкомпонентного воздушно-водяного рабочего тела с использованием квазиодномерной, двухплотностной, двухскоростной, двухтемпературной модели с учетом зависимости физических свойств от параметров течения для монодисперсного потока конденсированной фазы.

В рамках обратной задачи (задается двухпараметрический закон распределения давления вдоль сопла) проведено исследование влияния начальных и граничных условий, а также закона распределения давления на параметры течения и эффективность сопла. Рассматривается следующая задача. Пусть на входе в сопло имеется некоторое двухфазное рабочее тело, состоящее из жидких капель и газа. Все параметры на входе в сопло и начальный диаметр сопла заданы. Кроме того, задано давление на выходе из сопла. Требуется определить профиль канала сопла (его длину, размер выходного сечения и профиль канала на участке от входного до выходного сечения), который бы обеспечивал при заданных граничных условиях получение максимальной эффективности процесса. Известно, что для двухфазного рабочего тела в общем случае профиль канала определяется неоднозначно. В работе задача решалась на основе двухпараметрической оптимизации закона распределения давления.

Для решения поставленной задачи была выбрана следующая математическая модель двухфазного рабочего тела, удовлетворяющая следующим основным допущениям:

- капли равномерно распределяются в потоке газа и не взаимодействуют между собой;
- поток капель монодисперсный;
- газ является совершенным, псевдоидеальным (силы вязкости проявляются только при взаимодействии газа с частичками и со стенками сопла);
- течение одномерное, стационарное;
- капли сферические;
- отсутствуют фазовые переходы.

Рассматриваемая модель позволяет учесть наиболее существенные потери в двухфазном потоке, связанные с термической и динамической неравновесностью фаз. Для описания данной модели течения используется следующая система уравнений:

Уравнение неразрывности:

$$m_{\tilde{A}} = \rho_{\tilde{A}} W_{\tilde{A}} S_{\tilde{A}} = \text{const} \quad (1)$$

$$m_{\tilde{E}} = \rho_{\tilde{E}} W_{\tilde{E}} S_{\tilde{E}} = \text{const} \quad (2)$$

Уравнение движения капель:

$$m_{\tilde{E}} \frac{dW_{\tilde{E}}}{dx} = -S_{\tilde{E}} \frac{dP}{dx} + \frac{S_{\tilde{E}}}{V_{\tilde{E}}} D_{\tilde{N}\tilde{D}} \quad (3)$$

Уравнение движения двухфазного потока:

$$m_{\tilde{A}} \frac{dW_{\tilde{A}}}{dx} + m_{\tilde{E}} \frac{dW_{\tilde{E}}}{dx} = -S \frac{dP}{dx} - \frac{dF_{\tilde{O}D}}{dx} \quad (4)$$

Уравнение теплообмена:

$$m_{\tilde{E}}^* \frac{di_{\tilde{E}}}{dx} = \alpha \cdot f_{\tilde{H}\tilde{A}} (\dot{O}_{\tilde{A}} - \dot{O}_{\tilde{E}}) \frac{d\tau_{\tilde{E}}}{dx} \quad (5)$$

Уравнение энергии:

$$\left( i_{\tilde{A}} + \frac{W_{\tilde{A}}^2}{2} \right) m_{\tilde{A}} + \left( i_{\tilde{E}} + \frac{W_{\tilde{E}}^2}{2} \right) m_{\tilde{E}} = \left( i_{\tilde{A}0} + \frac{W_{\tilde{A}0}^2}{2} \right) m_{\tilde{A}0} + \left( i_{\tilde{E}0} + \frac{W_{\tilde{E}0}^2}{2} \right) m_{\tilde{E}0} \quad (6)$$

Уравнение состояния:

$$D = \rho_{\tilde{A}} R_{\tilde{A}} T_{\tilde{A}} \quad (7)$$

Здесь:

$m_{\tilde{A}}, m_{\tilde{E}}$  - массовый, секунднй расход газа и капель,

$\rho_{\tilde{A}}, \rho_{\tilde{E}}$  - плотность газа и капель,

$W_{\tilde{A}}, W_{\tilde{E}}$  - скорости газа и капель,

$T_{\dot{A}}, T_{\dot{E}}$  - температуры газа и капель,

$i_{\dot{A}}, i_{\dot{E}}$  - удельные энтальпии газа и капель,

$S_{\dot{A}}, S_{\dot{E}}$  - сечения потока газа и капель,

$D$  - давление газа,

$m_{\dot{E}}^*, V_{\dot{E}}$  - масса и объем капли,

$S$  - сечение двухфазного потока,

$D_{\ddot{N} \ddot{D}}$  - сила сопротивления капли,

$f_{\ddot{I} \dot{A}}$  - площадь поверхности капли,

$F_{\dot{O} \dot{D}}$  - сила трения потока о стенку канала сопла,

$\alpha$  - коэффициент теплоотдачи,

$\tau_{\dot{E}}$  - время,

$R_{\dot{A}}$  - газовая постоянная.

Для оценки эффективности сопла использовались следующие параметры:

1. Под эффективностью  $\eta$  сопла с двухфазным рабочим телом будем понимать отношение кинетической энергии двухфазного потока на выходе из сопла к кинетической энергии потока «фиктивного газа» при одинаковых граничных условиях. Предполагается, что физические свойства «фиктивного газа» не зависят от температуры (модель  $WT\rho^2$ ).

$$\eta = \frac{m_{\dot{A}0} (W_{\dot{A}}^2 + \ddot{I}_1 W_{\dot{E}}^2)}{m_{\dot{A}0} (1 + \ddot{I}_1) W_{WT\rho^2}^2} \quad (8)$$

Здесь:

$W_{WT\rho^2}$  - скорость «фиктивного газа»;

$\eta$ -эффективность сопла по сравнению с энергией равновесного истечения;

$$\ddot{I}_1 = \frac{m_{\dot{E}0}}{m_{\dot{A}0}} \quad (9)$$

2. Под эффективностью сопла, характеризующие эффективность смешения фаз, как отношение кинетической энергии двухфазного потока на выходе из сопла к сумме кинетической энергии потока жидкости и потока чистого газа при одинаковых граничных условиях. Обозначим его через  $\eta_{\ddot{N}}$  и запишем следующим образом:

$$\eta_{\tilde{N}} = \frac{m_{\tilde{A}} W_{\tilde{A}}^2 + m_{\tilde{E}} W_{\tilde{E}}^2}{m_{\tilde{A}} W_{\tilde{A}WT\rho}^2 + m_{\tilde{E}} W_{\tilde{E}WT\rho}^2} \quad (10)$$

Здесь:

$W_{\tilde{A}WT\rho}$  - скорость изобарического чисто газового течения;

$W_{\tilde{E}WT\rho}$  - скорость течения идеальной несжимаемой жидкости.

По приведенному выше алгоритму было произведено численное исследование на ЭВМ течения воздуховодяного рабочего тела в сопле в широком диапазоне начальных и граничных условий. Целью данной главы являлось исследование и расчет оптимального профиля сопла под требуемую систему энергетику. На Рис. 5-7 представлены результаты расчета сопла с расходом жидкой фазы 120 кг/с.

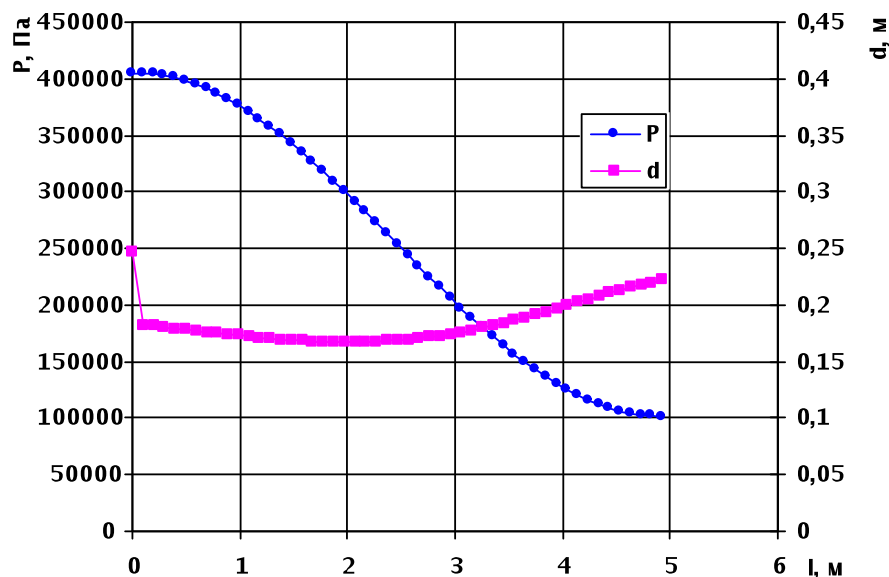


Рис. 5 Распределение давления по тракту сопла и его профиль.

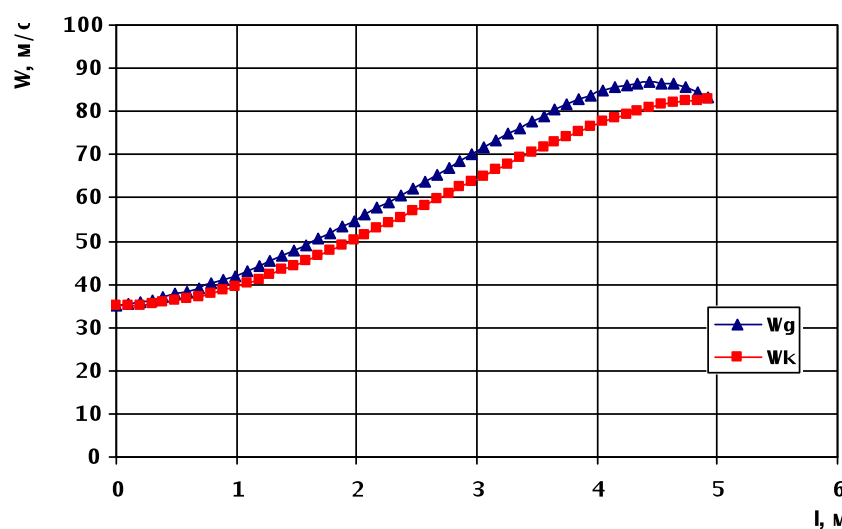


Рис. 6 Разгон фаз в сопле

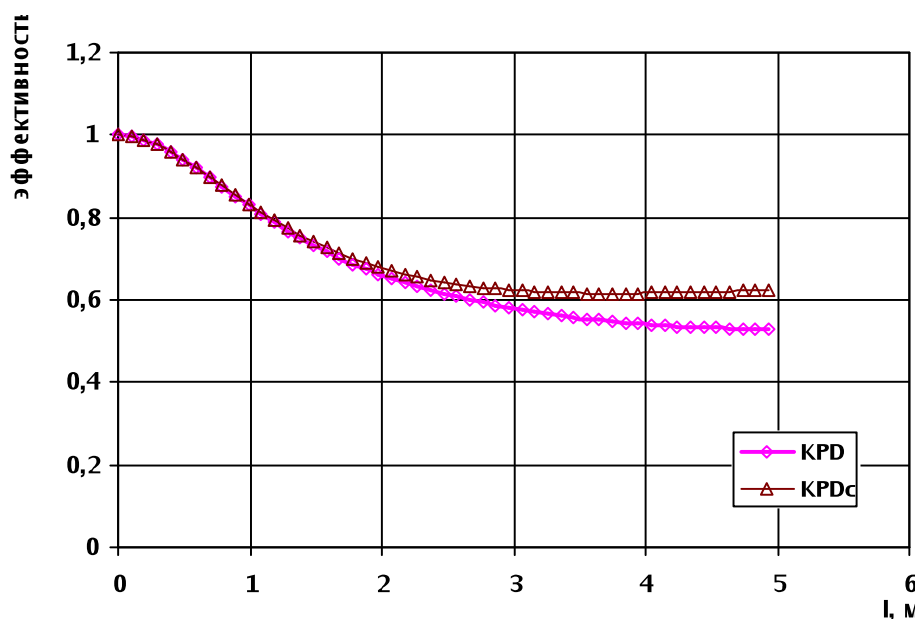


Рис. 7 Эффективность сопла

Полученное решение, несмотря на не учет некоторых факторов, таких как двухмерность и полидисперсность течения, отсутствие возможного учета пленки на стенках, достаточно точно отражает процесс движения фаз в сопле и его эффективность, которая обеспечивается выбранным законом распределения в сопле с одной стороны, и малой кривизной профиля сопла (Сопло имеет большую длину, порядка 20 калибров, в это м случае профиль имеет малую кривизну). Сравнение с результатами работы Яковлева А. А. (двумерная модель расчета) и Воронцового А.В. (экспериментальное исследование полей параметров) свидетельствует о малом отличии полученных результатов при одинаковых граничных условиях.

Исследование струи показало, что дальность струи практически не зависит от перепада давления на сопле, и определяется значением концентрации жидкости и размером капель, причем оптимальные значения соответствуют концентрации порядка  $\Pi_1=40$  и размеру капель порядка 100 мкм. Несмотря на сравнительно крупный размер капель в заданном диапазоне концентраций жидкости выбранный закон распределения давлений позволяет получить на срезе сопла равновесный режим по скоростям фаз, то есть обеспечить максимально возможную эффективность сопла при заданных граничных условиях.

### *Третья глава*

Третья глава посвящена исследованию и выбору смесительного устройства для обеспечения требуемых режимов работы сопла с двухфазным

рабочим телом, получения максимальной дальности струи, при минимальных затратах мощности.

Смесительное устройство – один из важнейших элементов системы для формирования двухфазного потока. Дальность струи, дисперсность жидкой фазы, режим работы сопла и энергетику системы в целом определяет работа смесительного устройства.

Были разработаны, изготовлены и исследованы различные варианты смесителей, из которых был выбран вариант, обеспечивающие выполнения следующих требований:

- получение требуемой дисперсности жидкой фазы на начальном участке 5-15 калибров от среза смесителя,
- получение равномерного поля концентрации,
- получение определенной скорости истечения двухфазного потока,
- работа при низком перепаде давления (потери минимальны),
- широкий диапазон работы.

Для исследования данного смесителя спроектирована модель Рис. 8.

Модель смесителя представляет собой корпус 2 с различными комплектами промежуточных сопел 1. Вода подается через штуцер 4, а воздух для смешения через штуцер 5. Собирая различные комбинации сопел, можно значительно расширить номенклатуру изучаемых смесителей.

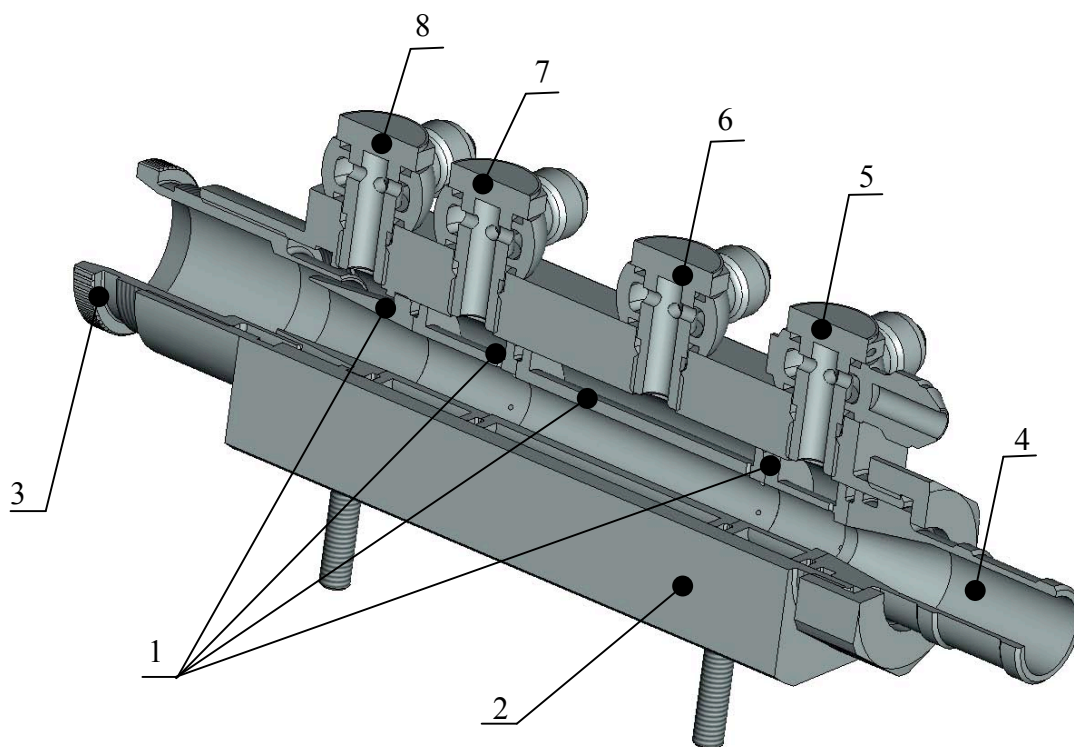
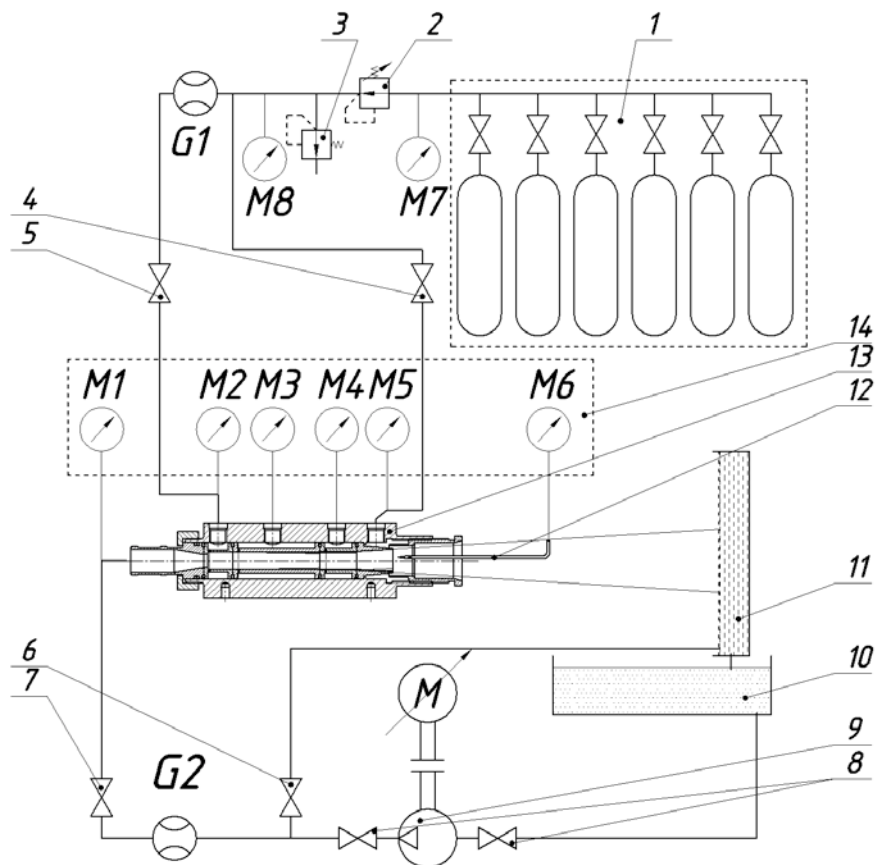


Рис. 8 Конструкция смесителя

Для имитации коаксиального вдува воздуха можно использовать штуцер 8, а для изменения режима работы регулировочный элемент 3. Штуцеры 6 и 7 необходимы для контроля статического давления по тракту смесителя.

Схема стенда для испытания форсунки Рис. 8 представлена на Рис. 9.



1. Баллонная батарея (6 баллонов 40л с давлением в каждом по 120 кгс/см<sup>2</sup>); 2. Воздушный редуктор GCE200/30; 3. Предохранительный клапан на 15 кгс/см<sup>2</sup>; 4. Кран подачи воздуха в коаксиальное сопло; 5. Кран-дроссель подачи воздуха в смеситель; 6. Кран перепуска жидкости в бак; 7. Кран подачи воздуха в смеситель; 8. Сервисные краны для работы с насосом; 9. Частотно-регулируемый центробежный насос Grundfos CR10-12; 10. Бак с водой; 11. Отбойник для струи; 12. Зонд для измерения статического давления; 13. Смеситель; 14. Панель с манометрами.

Рис. 9 Схема стенда испытаний смесительного устройства.

Гидравлическая часть стенда работает по замкнутой схеме. Центробежный насос Grundfos CR10-12 забирает воду из бака 10 и подает ее на вход в смеситель 13. Регулировка требуемых параметров жидкости осуществляется краном перепуска 6, краном подачи воды 7, а также при помощи частотного преобразователя. Далее струя гасит свою скорость в отбойнике 11 и жидкость перетекает обратно в бак. Пневматическая часть стенда состоит из баллонной батареи 1, редуктора 2, предохранительного клапана 3 и кранов для подачи воздуха в смеситель 5 и коаксиальное сопло 4. Регулировать расход воздуха в смеситель можно при помощи крана 5. Все манометры объединены в панель 14. Стенд оснащен Турбинным расходомером

G1 и кориолисовым расходомером G2. Для определения скорости, полей скорости использовался 2D-PIV метод.

Измерение дисперсности жидкой фазы проводилось методом малоуглового рассеяния, а именно методом интегрирующей диафрагмы, отличающимся своей оперативностью. Схема данного измерителя представлена на Рис. 10.

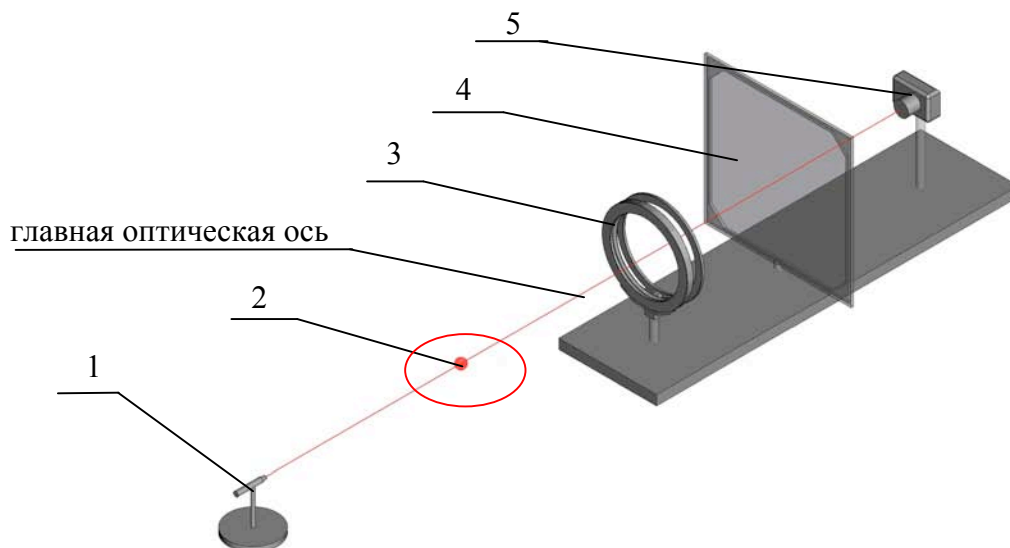


Рис. 10 Схема пространственного расположения основных элементов лазерного измерителя.

Измеритель содержит полупроводниковый лазер 1 (красный, длина волны 650нм) зондирующего измерительный объем 2 с частицами аэрозоля (см. Рис. 12). Свет, рассеянный в прямом направлении и под малыми углами, попадает на Фурье-линзу 3, в фокальной плоскости которой установлен экран 4. Фокусное расстояние Фурье-линзы 500 мм, световой диаметр 195 мм. Экран изготовлен из матированного с одной стороны стекла толщиной 3 мм размером 300×300мм. Распределение интенсивности света в фокальной плоскости линзы (часть индикатрисы, соответствующая малоугловому рассеянию) регистрируется цифровым фотоаппаратом 5. Фурье-линза 3, экран 4 и цифровой фотоаппарат 5 входят в состав приемного оптоэлектронного блока. Управление фотоаппаратом 5 осуществляется компьютером. Возможен и ручной режим управления фотоаппаратами. Также в компьютер поступает информация, зарегистрированная этими фотоаппаратами, где по специальным программам она и обрабатывается.

Анализ полученных результатов показывает, что с ростом расхода газа (с 3,5 до 8,5 гр./с) при постоянном расходе жидкости равном 2 кг/с, средний диаметр капель уменьшается и при достижении определенного значения

остается постоянным  $\approx 100$  мкм., угол раскрытия струи имеет характерную точку перегиба и максимум, длина не распавшейся сплошной части струи уменьшается (примерно до 120-150 мм.), скорость истечения из сопла увеличивается.

При постоянной концентрации жидкой фазы и увеличении расхода жидкости с 1,5 до 2,25 кг/с скорость истечения увеличивается на 50% и составит  $\approx 50$  м/с, средний размер имеет минимум в районе 2 кг/с.

Интересные результаты, подтверждающие наличие сложной волновой структуры в двухфазном газокапельном потоке внутри смесителя были получены при сканировании зондом статического давления (Рис. 11).

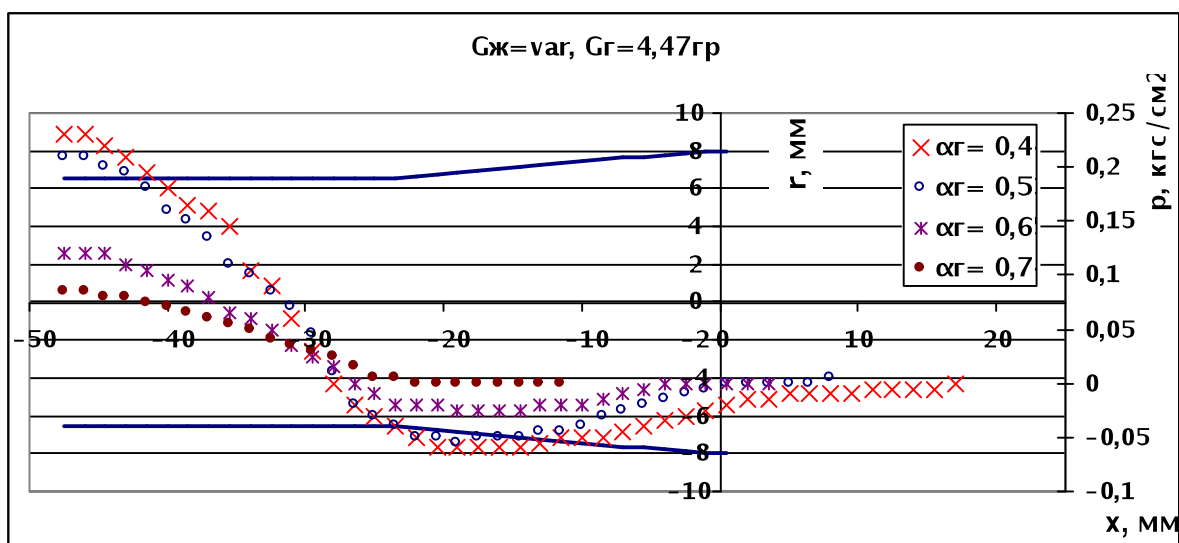


Рис. 11 Распределение статического давления

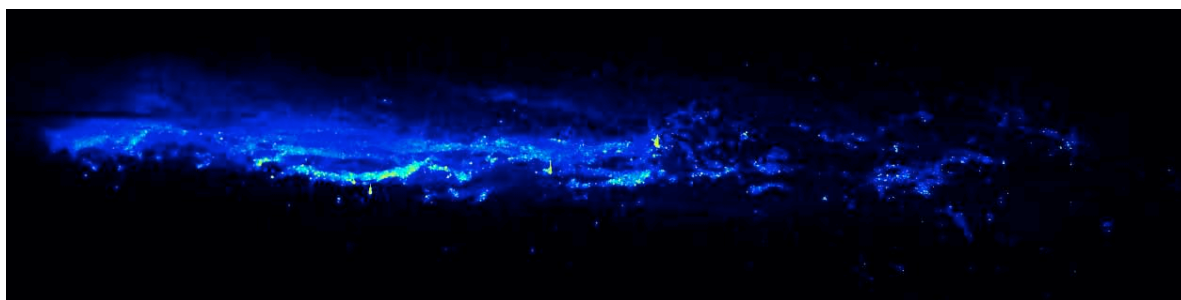


Рис. 12 Высокоскоростная фотография двухфазной высококонтрированной газокпельной струи.

Изображение двухфазной высококонтрированной (П1=40) газокпельной струи представлено на Рис. 12.

#### *Четвертая глава*

Четвертая глава посвящена и следованию двухфазной высококонтрированной струи с расходом жидкой фазы 50кг/с. на полноразмерной моделирующей установке.

Для полноразмерной установки моделирующей двухфазное течение (Рис. 13) была разработана и изготовлена на базе предыдущих исследований конструкция смесительного устройства для сопла с расходом жидкой фазы 50кг/с. Модель данного устройства представлена на Рис. 14.



Рис. 13 Полноразмерная установка, моделирующая двухфазное течение.

Данное смесительное устройство позволяет:

- получить равномерные поля скорости и дисперсности на расстоянии уже в 200-250мм;
- отрегулировать регулировочными элементами баланс расхода воздуха подаваемого в смеситель и сопло;
- изменять суммарный расход жидкости путем постановки заглушек вместо смесителей;
- работать в широком диапазоне давлений газовой и жидкой фазы;
- работать с примесями.

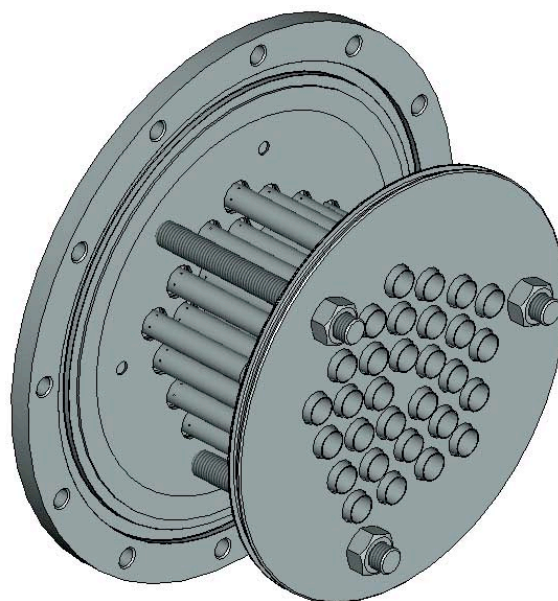


Рис. 14 Модель смесительного устройства для сопла с расходом жидкой фазы 50кг/с.

1. Испытание установки формирования газок капельных струй полностью продемонстрировало работоспособность и высокую эффективность газодинамической технологии: увеличение дальности струи в три раза и формирование на конечном участке облака капель мелкодисперсной структуры.

2. Впервые при ограниченном расходе жидкости 50кг/с получена дальность струи 130м, что не имеет ни мировых, ни зарубежных аналогов. Данный результат впервые подтвердил достоверность моделей расчетов сопла и струи с расходом жидкой фазы 50кг/с.

### Пятая глава

Пятая глава посвящена исследованию работы схемы (Рис. 15) установки пожаротушения большой мощности, использующей в качестве источника мощности газотурбинный двигатель, при различных комбинациях элементов входящих в схему, а также подбору конкретного двигателя. Рассматривается следующая задача. Все параметры системы заданы. Требуется определить конфигурацию системы, которая бы обеспечивала при заданных граничных условиях получение максимальной эффективности установки.

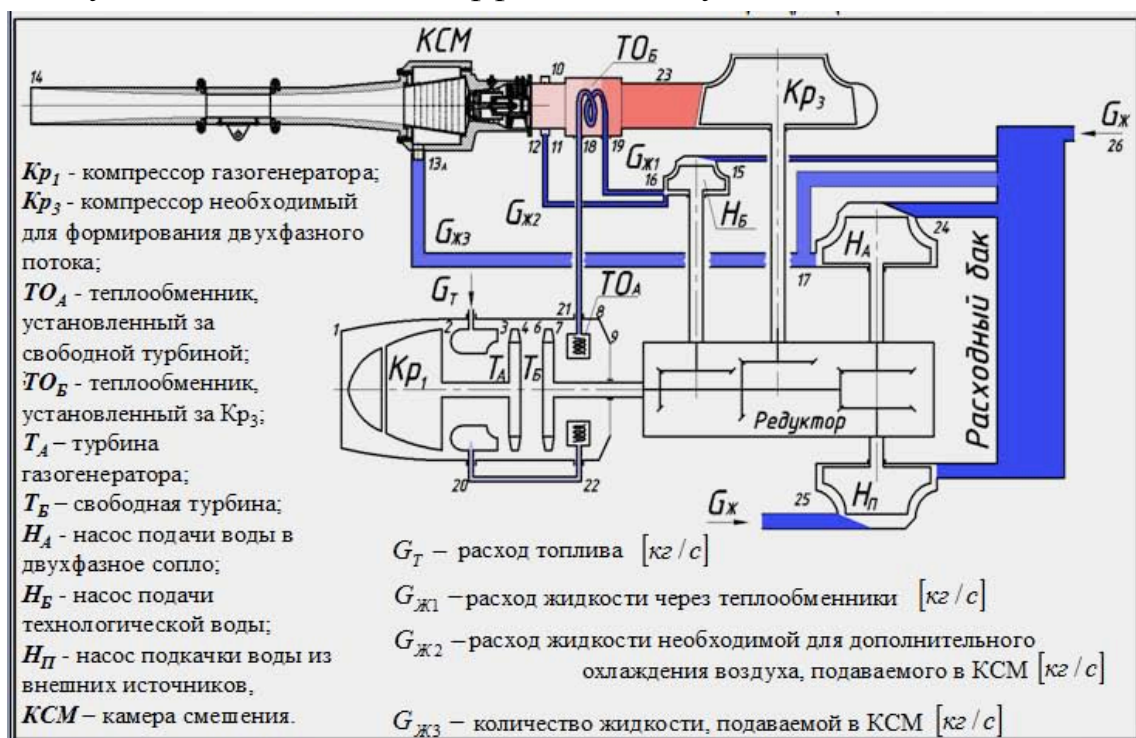


Рис. 15 Схема установки пожаротушения большой мощности.

Работа системы осуществляется по следующей схеме. На первом этапе запускают газогенератор, который приводит во вращение свободную турбину. Мощность от свободной турбины через вал передается на вспомогательные агрегаты системы  $Kp_3$ ,  $H_A$ ,  $H_B$ . Из РБ вода подается на насосы. Насос  $H_A$  обеспечивает жидкостью сопло с двухфазным рабочим телом, а насос  $H_B$  прокачивает технологическую воду через теплообменники  $TO_A$   $TO_B$ . Таким образом, в системе реализуется цикл с регенерацией тепла и запуск двухфазного сопла. Возможен вариант, когда в системе идет отбор мощности на  $H_{II}$ .

Для оценочного расчета параметров установки была разработана математическая модель и программа расчета, позволяющая выбрать оптимальный состав элементов, входящих в схему с точки зрения получения максимальных характеристик системы. Математическая модель строилась на базе следующих уравнений:

- уравнение баланса расходов;
- уравнение баланса мощностей;
- уравнение теплового баланса.

В составе рабочего тела учитываются продукты сгорания керосина. Состав (весовые доли) недиссоциированных продуктов сгорания керосина определяется коэффициентом избытка воздуха  $\alpha$ .

Производилось исследование работы теплообменников  $ТО_A$  и  $ТО_B$  в различных режимах его работы.

В расчете теплообменников учитывались теплофизические свойства воды и пара.

Для оценки эффективности системы были разработаны следующие критерии:

1. Величина  $\Sigma N$  показывает, какую мощность необходимо затратить для формирования двухфазного потока:

$$\Sigma N = N_{\dot{E}\delta 3} + N_{\dot{I}A} + N_{\dot{I}A} + N_{\dot{I}B} \quad (11)$$

2.  $l_1$  - параметр оценки потребляемой мощности на 1 кг. газа для струи.

$$l_1 = \frac{\Sigma N}{G_{A23}} \quad (12)$$

$G_{A23}$  - расход воздуха в компрессоре  $Kp_3$ .

3.  $l_2$  - параметр равный отношению потребляемой мощности к мощности компрессора.

$$l_2 = \frac{\Sigma N}{N_{\dot{E}\delta 1}} \quad (13)$$

$N_{\dot{E}\delta 1}$  - мощность компрессора газогенератора.

4.  $l_3$  - параметр равный отношению потребляемой мощности к мощности создаваемой турбинами.

$$l_3 = \frac{\Sigma N}{N_{\dot{O}A} N_{\dot{O}A}} \quad (14)$$

$N_{\dot{O}A}$  - мощность турбины газогенератора;

$N_{\dot{O}A}$  - мощность свободной турбины.

Также оценивался коэффициент возврата тепла, удельный расход топлива и удельная мощность.

В данной работе исследовались следующие варианты работы системы (см. Таблица 1)

Таблица 1 Варианты расчета системы

| №   | Режим работы системы                                                                                        |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.1 | Жидкость (пар) не подается в КСГ. Насос подкачки отключен.                                                  |
| 1.2 | В КСГ подается жидкость. После Т <sub>ОА</sub> и Т <sub>ОБ</sub> жидкость. Насос подкачки отключен.         |
| 1.3 | В КСГ подается пар. После Т <sub>ОБ</sub> жидкость. После Т <sub>ОА</sub> пар. Насос подкачки отключен.     |
| 1.4 | В КСГ подается пар. После Т <sub>ОА</sub> и Т <sub>ОБ</sub> пар. Насос подкачки отключен.                   |
| 2.1 | В КСГ подается жидкость. После Т <sub>ОБ</sub> жидкость. Т <sub>ОА</sub> отключен. Насос подкачки отключен. |
| 2.2 | В КСГ пар. После Т <sub>ОБ</sub> пар. Т <sub>ОА</sub> отключен. Насос подкачки отключен.                    |
| 2.3 | В КСГ подается жидкость. После Т <sub>ОА</sub> жидкость. Т <sub>ОБ</sub> отключен. Насос подкачки отключен. |
| 2.4 | В КСГ подается пар. После Т <sub>ОА</sub> пар. Т <sub>ОБ</sub> отключен. Насос подкачки отключен.           |
| 3.1 | Жидкость (пар) не подается в КСГ. Насос подкачки включен.                                                   |
| 3.2 | В КСГ подается жидкость. После Т <sub>ОА</sub> и Т <sub>ОБ</sub> жидкость. Насос подкачки включен.          |
| 3.3 | В КСГ подается пар. После Т <sub>ОБ</sub> жидкость. После Т <sub>ОА</sub> пар. Насос подкачки включен.      |
| 3.4 | В КСГ подается пар. После Т <sub>ОА</sub> и Т <sub>ОБ</sub> пар. Насос подкачки включен.                    |
| 4.1 | В КСГ подается жидкость. После Т <sub>ОБ</sub> жидкость. Т <sub>ОА</sub> отключен. Насос подкачки включен.  |
| 4.2 | В КСГ пар. После Т <sub>ОБ</sub> пар. Т <sub>ОА</sub> отключен. Насос подкачки включен.                     |
| 4.3 | В КСГ подается жидкость. После Т <sub>ОА</sub> жидкость. Т <sub>ОБ</sub> отключен. Насос подкачки включен.  |
| 4.4 | В КСГ подается пар. После Т <sub>ОА</sub> пар. Т <sub>ОБ</sub> отключен. Насос подкачки включен.            |

Целью решения данной задачи является определение максимально возможной эффективности и экономичности системы пожаротушения, и сформулировать рекомендацию к проектированию данной установки.

Результаты исследования были сведены в итоговые диаграммы. Следует отметить, что данные исходные значения выбирались из множества решений (для каждого варианта работы системы с учетом налагаемых ограничений) и им соответствуют оптимальные параметры, характеризующие эффективность системы. На Рис. 16 и 17 видно, что максимально возможная эффективность достигается в варианте работы системы, где в камеру сгорания впрыскивается жидкость, т. е. в варианте №2.1. Расход топлива минимален (на 20% ниже, чем у соседнего варианта №1.3), при сравнительно большом объеме впрыскиваемой в КСГ жидкости (см. Рис. 16).

Эффективный КПД двигателя максимален у варианта работы системы №1.4 (см. Рис. 17). Требуемая мощность для получения 1 кг. Газа струи остается примерно постоянной (для вариантов, в которых насос подкачки отключен), однако, параметр равный отношению  $p$  отребляемой мощности к мощности создаваемой турбинами максимален в варианте №2.1 (см. Рис. 17).



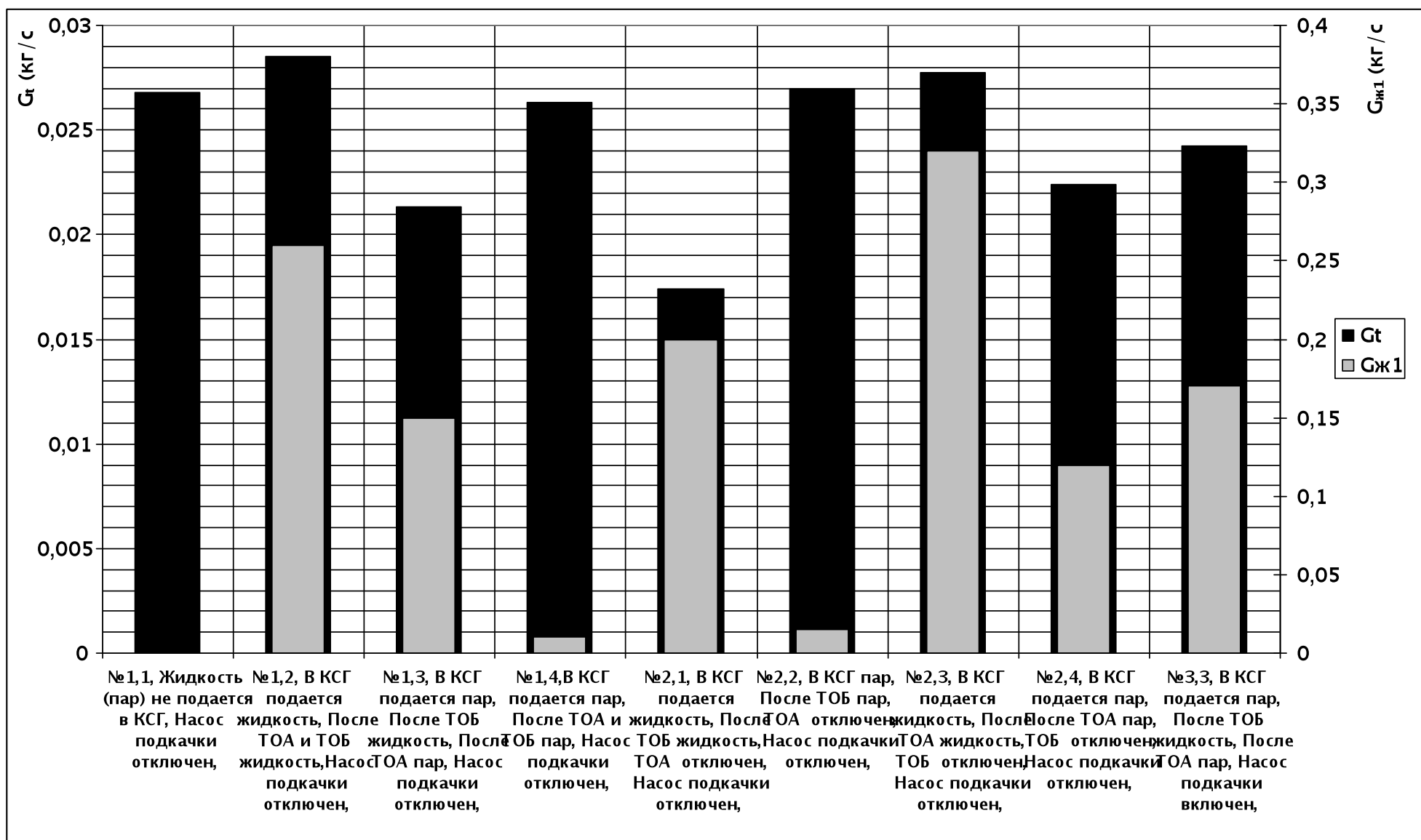


Рис. 17 Показатели эффективности в зависимости от режима работы системы.

Удельная мощность максимальна у варианта №2.1, удельный расход топлива минимален у варианта №1.4. Следует отметить, что если реализовать систему пожаротушения большой мощности и дальности действия, на базе варианта работы №2.1, то можно воспользоваться газогенератором меньших размеров, по сравнению с другими вариантами работы системы.

Также следует отметить, что в вариантах №1.2 и 2.1 происходит снижение температуры воздуха, подаваемого в КСМ, более чем на 100К, а в варианте №1.3 температура воздуха снизилась на  $\approx 80\text{К}$ , а в свою очередь снижение температуры воздуха на  $\approx 100\text{К}$  приведет к увеличению эффективности сопла на  $\approx 10\%$ .

На основании вышесказанного можно подвести итог, что система с вариантом работы №2.1 будет являться наиболее эффективной, т.к. практически все основные параметры, характеризующие эффективность самой системы в целом и сопла с двухфазным рабочим телом максимальны. Вариант №2.1 предусматривает работу только одного теплообменника  $\text{ТО}_B$ , который охлаждает воздух, подаваемый в камеру смешения, и нагревает воду, впрыскиваемую в виде жидкости в камеру сгорания, тем самым, реализуя цикл с регенерацией тепла. В данной программе расчета была заложена модель с теплообменниками попутного типа. Повысить эффективность теплообменника можно за счет использования противоточной схемы.

При проектировании системы следует учесть и следующий факт, что использовать большие значения температуры газа перед турбиной ( $\dot{O}_{A3}^* > 1400\text{Е}$ ) не целесообразно по нескольким причинам:

- Рост температуры не приводит к существенному улучшению параметров, оценивающих эффективность системы в целом, а только ведет к заметному усложнению конструкции и уменьшению ресурса силовой установки;

- Рост температуры газа перед турбиной требует увеличения отбираемого у компрессора воздуха на нужды охлаждения (в данной работе коэффициент отбираемого воздуха оставался постоянным на протяжении всего расчета).

## **Заключение**

Проведено комплексное теоретическое и экспериментальное исследование авиационного ГТД в системе пожаротушения большой мощности и дальности действия, что позволило:

- Предложить устройство формирования дальнобойной газокапельной струи и сформулировать математические модели и рекомендации для его проектирования;
- Предложить смесительное устройство, обеспечивающее формирование рабочего тела на входе в сопло, заданной структуры и параметров в определенном диапазоне режимов работы;
- Подтвердить возможность создания системы пожаротушения большой мощности и дальности действия на основе разработанных в работе рекомендаций;
- Сформулировать рекомендации по выбору схем ГТД на базе конкретных отечественных авиационных двигателей для создания систем пожаротушения большой мощности и дальности действия, в частности наиболее эффективной является схема с одним теплообменником, установленным после вспомогательного компрессора с впрыском жидкости в камеру сгорания;
- Полученные результаты по дальности, и структуре газокапельных струи при одинаковых граничных условиях не имеют мировых и отечественных аналогов.

**Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:**

1. Зуев Ю. В., Лепешинский И. А., Решетников В.А., Истомин Е. А. Выбор критериев и определение их значений для оценки характера взаимодействия фаз в двухфазных турбулентных струях // Вестник Московского государственного технического университета имени Н. А. Баумана, 1(86)2012. –С. 42-53.
2. Зуев Ю. В., Лепешинский И. А., Решетников В.А., Истомин Е. А. Особенности двухфазных струй с большой концентрацией дисперсной фазы // Математическое моделирование. – 2012. –Т.24, №1. - С. 129-142.
3. Лепешинский И . А ., Зуев Ю. В ., Кирдсук С ., Истомин Е. А . Газотурбинный двигатель как источник рабочего тела в системе пожаротушения большой мощности и дальности действия // Вестник МАИ. 2008. Т15. №4. – С. 44-49.
4. Лепешинский И . А ., Зуев Ю. В ., Баранов П . А ., Кирдсук С ., Истомин Е. А . Авиационные ГТД в системах пожаротушения большой мощности и дальности действия // С борник тезисов докладов XIII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели», - М.: Печатный салон «СПРИНТ», 2008. - С. 36-37.
5. Лепешинский И .А. Зуев Ю.В. Истомин Е.А. Вертолетные ГТД в системе пожаротушения большой мощности и дальности действия // Модернизация и инновации в авиации и космонавтике под редакцией профессора Ю. Ю. Комарова. – М.: МАИ, 2010. - С. 363-366.