

**На правах рукописи**

**ЦИПЕНКО Антон Владимирович**

**ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ПРОТИВОПОЖАРНЫХ СИСТЕМ НА ВОЗДУШНОМ  
ТРАНСПОРТЕ**

**Специальность 05.26.02 - Безопасность в чрезвычайных ситуациях (на  
воздушном транспорте).**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**Москва - 2006**

Работа выполнена в Научно-исследовательском институте низких температур при Московском государственном авиационном институте (НИИ НТ МАИ).

Научный консультант:

доктор физико-математических наук, профессор Ю.М.Давыдов,  
директор Института механики и экологии.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А.И.Фролков, главный научный  
сотрудник НЦ-13 ФГУП ГосНИИ ГА

доктор технических наук, В.Т.Калугин, профессор кафедры М-3  
«Баллистика и аэродинамика» МГТУ им. Н.Э.Баумана.

доктор технических наук, И.В.Деревич, профессор кафедры  
«Термодинамика и теплопередача» МГУИЭ.

Ведущая организация:

ФГУП ВНИИ противопожарной обороны (ВНИИПО).

Защита состоится 7 июня 2006 г. в 15<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д.315.02.01 при Государственном научно-исследовательском институте гражданской авиации (ФГУП ГосНИИ ГА) по адресу 141426, Московская обл., Химкинский район, аэропорт Шереметьево, а/я 26, ГосНИИ ГА.

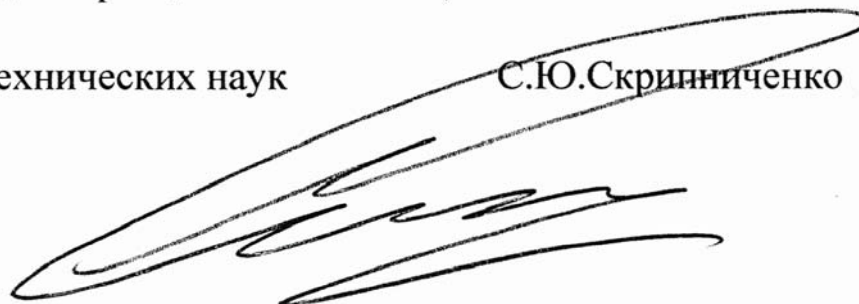
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГосНИИ ГА и на сайте [www.lnm.ru](http://www.lnm.ru) (раздел «Наши публикации»).

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2006 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор технических наук

С.Ю.Скрипниченко



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Противопожарные системы на воздушном транспорте можно рассматривать с двух позиций: тушение пожаров на объектах воздушного транспорта (ВТ) и тушение пожаров с помощью воздушных судов (ВС). Специфичность этих систем проявляется, в частности, в создании специализированных аэродромных пожарных автомобилей. Другая черта, характерная для объектов транспорта, связана с тем, что необходимо обеспечить сохранение функций объектов во время пожара и минимизировать вторичный ущерб, то есть сохранить дорогостоящее оборудование и информацию, защитив их не только от огня, но и от средств тушения.

Что касается пожаров на наземных объектах, то они обладают общей, причем не только для транспорта, особенностью - это большое скопление людей, материальных ценностей и горючих материалов (топливо, пластики и т.п.). Возгорание в местах большого скопления людей наилучшим образом ликвидируется мобильными автономными малогабаритными средствами тушения (например, огнетушителями), которые используются подготовленным обслуживающим персоналом, причем огнетушащие вещества должны быть безопасны для людей и не вызывать панику.

Что касается пожара при авиационном происшествии (АП), то на примере технологических карт тушения типовых пожаров (возгорание шасси, двигателя, пожар внутри салона, горение разлитого топлива) на крупном ВС видно, что общее во всех картах - это такой этап тушения, как охлаждение конструкций. Доля жидкости, расходуемой на этот этап, составляет десятки процентов от общего расхода тушащей жидкости.

Практически не решенная задача – тушение пожара в салоне ВС, когда складывается наиболее опасная для жизни пассажиров и экипажа и тактически сложная обстановка. Установлено, что каждый год из 1500 человек, погибших в АП, 270 погибают в результате удушья дымом или токсичными газами, под воздействием тепла, а также в процессе эвакуации.

Наконец есть ещё один опасный тип пожара в аэропорту – это пожар на (около) топливных емкостях. Здесь, как и при пожаре на месте АП, одна из основных задач – охлаждение конструкций.

Таким образом, из изложенного выше вытекает, что средства тушения должны:

- обеспечить сохранение функций объектов во время пожара и минимизировать вторичный ущерб;
- быть мобильными, по возможности автономными и малогабаритными;
- обеспечивать эффективное охлаждение конструкций;
- содержать безопасные для людей огнетушащие вещества.

Все эти требования удовлетворяют системы, использующие диспергированную воду. Основное преимущество водяного тумана (рис. 1) с каплями менее 200 мкм состоит в большой скорости поглощения тепла из горючих газов и пламени. Вторым эффектом - оттеснения кислорода из зоны пламени. Третьим механизмом подавления огня является интенсивное поглощение теплового излучения.



**Рис.1. Ранцевая (внизу слева) и вертолетная (вверху слева) двухфазные системы пожаротушения. Справа – снимок струи недалеко от среза разгонного сопла; каждая «звездочка» - отразившая свет вспышки капля.**

Пожаротушение с помощью тонкораспыленной воды имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с существующими системами:

- высокая эффективность тонкораспыленной воды, уменьшающая ее потребность для ликвидации загораний в 5 - 7 раз по сравнению традиционными системами, что, например, значительно повышает возможности противопожарных автомобилей быстрого реагирования;
- значительно уменьшаются ущерб от пожара и от последствий его тушения;
- полная экологическая безопасность средств пожаротушения.

Исследования также показывают, что максимальная теплоотдача с твердых поверхностей получается при охлаждении их тонкораспыленной водой, когда на поверхности нет сформировавшейся водяной пленки. В этом случае теплоотдача увеличивается в несколько раз, что позволяет соответственно сократить расход огнетушащего состава на охлаждение конструкций.

Можно с уверенностью сказать, что тонкораспыленная вода является в настоящее время наиболее перспективным огнетушащим веществом. Вместе с тем, несмотря на очевидные преимущества, применение тонкораспыленной воды до настоящего времени ограничивалось возможностями систем, способных доставить мелкодисперсный поток к месту возгорания.

Сопла оросителей подразделяются по способу распыления жидкости на струйные сопла высокого давления, сопла с разбиением жидкости за счет взаимодействия струй, сопла с разбиением жидкости за счет соударения струи жидкости с дефлекторами, а также газодинамические сопла (двухфазные сопла).

Из рассмотренных типов только двухфазные сопла могут дать максимально высокую скорость капель при одинаковом перепаде давления вдоль сопла. В такой системе для повышения скорости жидкости используется энергия газовой фазы, а в начальном сечении получаемой струи присутствует и газ, и жидкость. Такой способ увеличения скорости жидкости получил название газодинамического способа и имеет одно, но принципиальное преимущество перед способом повышения давления - это возможность получения высокоскоростных струй при низком начальном давлении фаз. Еще одним преимуществом двухфазных струй является принципиальная возможность управлять дисперсностью струи путем соответствующей организации процесса смешения фаз и профилирования сопла для разгона полученной газокапельной смеси.

Именно такой способ реализован в новых системах пожаротушения, разработанных НИИ НТ при МАИ и выпускаемых ООО «ТЕМПЕРО», в исследовании и совершенствовании которых принимал участие автор. Представление о таких потоках и установках дают фотографии, приведенные на рис.1. По своим возможностям такие установки универсальны и могут применяться с одинаково хорошей эффективностью для тушения твердых и жидких горючих веществ, электроустановок под напряжением, как на открытом пространстве, так и в

помещениях. Созданные установки пожаротушения с расходом воды 0.4-40 л/с, расположенные на наземных объектах ВТ, позволят значительно повысить эффективность тушения локальных возгораний без какого-либо вредного воздействия на людей.

Характерные особенности потоков в соплах таких установок:

- многофазность (дисперсность): через канал текут газ и жидкость, причем жидкость может быть большей частью в капельном виде;
- большая массовая доля жидкости (более 0.9), а объемная доля капель может составлять десятки процентов;
- капли достаточно мелкие и их очень много;
- параметры газа и жидкости не сильно отличаются от соответствующих нормальным условиям;
- нет интенсивного подвода или отвода тепла;
- поток динамически неравновесный, то есть на всем протяжении сопла скорости газа и жидкости могут существенно отличаться.

При создании систем пожаротушения было необходимо:

- спроектировать канал для разгона водовоздушной смеси;
- спрогнозировать характер (тип) и параметры потока, исходя из предполагаемых профиля канала и способа смешения газа и жидкости, причем необходимо получить распределение параметров вдоль радиуса у среза сопла, так как от этого зависят дисперсность и дальнобойность струи;
- выбрать способы совершенствования опытных установок.

Для решения этих задач необходимы понимание физических процессов, проходящих в потоке, и надежная математическая модель течения.

Что касается тушение пожаров с помощью ВС, то из анализа патентной документации по технологиям пожаротушения можно сделать вывод о том, что в настоящее время очень мало установок для тушения высотных пожаров, причем большинство – проекты, не доведенные до практического использования.

Характерные особенности пожара на высотном объекте следующие:

- объект расположен в крупном населенном пункте, то есть весьма вероятно, что подъезд к нему по земле затруднен из-за автомобильных «пробок», особенностей застройки и т.п.;

- в зоне пожара (на горящем объекте) весьма вероятно нахождение людей;
- для тушения используется специальное оборудование и подготовленный персонал (это связано, в частности, с необходимостью обеспечить подачу тушащих веществ на большую высоту).

В свете вышесказанного достаточно очевидно, что наилучших результатов, в качестве средства быстрого реагирования, следует ожидать от сочетания «вертолет + диспергированная вода», что подтверждается и результатами патентного поиска.

От потока в установке вертолетного базирования (рис.1) следует ожидать тех же характерных особенностей, что и в упомянутых выше газочапельных системах НИИ НТ МАИ. Однако, в связи с большой стоимостью и трудностями экспериментального исследования, в этом случае острее стоит проблема построения адекватных феноменологической (физической) и математической моделей потока, предсказания его параметров на этапе проектирования, что необходимо для правильных конструктивных решений.

**Состояние проблемы.** При исследовании особенностей течения на первый план выходят задачи построения соответствующей физической модели (под физической моделью здесь понимается набор основных факторов, особенностей, условий, характеризующих поток, то есть то, что иногда называют феноменологическим описанием), учитывающей наиболее важные явления и процессы в потоке, и запись математической модели (ММ), позволяющей рассчитать параметры потока с достаточной точностью, поэтому сначала рассмотрим теоретические исследования многофазных течений в соплах.

Хорошо известны одномерные модели таких потоков. Но такие модели по своей сути не могут предсказать распределение параметров на выходе из канала, а эти данные необходимы для хорошего прогнозирования параметров струи.

Пространственные расчеты многофазных течений проводились в целом ряде работ для частиц и капель с учетом вращения, полидисперсности, столкновений, аэродинамического дробления. Однако в исследованных потоках была мала объемная доля капель, что позволяло авторам делать ряд упрощений при построении моделей или при проведении конкретных расчетов.

Потоки с пленкой теоретически исследовались в задачах теплообмена или моделирования работы аппаратов химического производства. Большой комплекс работ связан с безопасностью ядерных реакторов и других сооружений.

Но особенности сопловых течений (относительно большие градиенты параметров, динамическая неравновесность фаз) в этих задачах не учитываются или учитываются с серьезными упрощениями.

Таким образом, задача моделирования пространственного (двух- и трехмерного) газожидкостного соплового потока с учетом полидисперсности, столкновений, аэродинамического дробления, массообмена с пленкой, толщины пленки не рассматривалась применительно к потокам с высокой массовой долей капель.

Что касается экспериментальных исследований таких потоков, то большой комплекс работ был проведен в Харьковском и Московском авиационных институтах. Среди похожих есть работы по струйным аппаратам. Аналогичные исследования проводились и в других организациях. Однако в подавляющем большинстве исследований определяются только средние параметры потока. Вместе с тем эксперименты показывают, что существует проблема определения коэффициента сопротивления для фрагментов дискретной фазы (капель), что важен способ смешения газа и жидкости, что есть проблемы в описании взаимодействия газа и пленки. На практике это проявляется в многообразии конструкций для смешивания газа и жидкости и разгона смеси, при этом ответ на вопрос, насколько оптимальна данная конструкция, обычно отсутствует.

Таким образом, на сегодня нет однозначного ответа на вопрос о пригодности той или иной модели для расчета параметров динамически неравновесных газокапельных потоков при значительном содержании жидкости в соплах, соответственно нет и достаточных для понимания всех особенностей течения экспериментальных данных.

**Цель работы.** Разработать физическую и математическую модели газокапельного потока в перспективных системах пожаротушения при большом содержании жидкости.

**Задачи исследования.** Для достижения поставленной цели необходимо:

- определить характерные параметры исследуемых потоков;
- сформулировать математическую модель газокапельного потока с учетом пленки, полидисперсности, столкновений, аэродинамического дробления капель;



- выбрать метод расчета параметров потока и пленки;
- провести численное исследование потока, выявить пространственные особенности;
- провести экспериментальное исследование пространственной структуры потока;
- на основании сопоставления результатов численных и натуральных экспериментов показать способность модели отражать пространственные особенности потоков высокой концентрации.

**Методы исследования.** Для решения поставленных задач комплексно используются теоретические и экспериментальные методы исследования. При проведении экспериментов предпочтение отдано зондовым и оптическим методам. В качестве теоретического используется метод численного моделирования.

Существует множество способов моделирования многофазных течений. Ограничимся случаем, когда непрерывную фазу (газ) можно считать сплошной средой, что касается дискретной фазы (жидкости), то в настоящем исследовании был выбран подход взаимопроникающих континуумов (Х.А.Рахматулин), так как он требует минимальных ресурсов при численном моделировании.

Для решения системы уравнений математической модели был взят метод «крупных частиц». Это вызвано способностью метода рассчитывать все поле течения без выделения особенностей.

Что касается экспериментов, то в работе, для исследования детальной структуры потока (скорости газа и капель, дисперсный состав, термодинамические характеристики), использовались зонд-пробоотборник, зонд – измеритель полного давления (в отличие от потока газа или жидкости, где измеряется именно полное давление, в двухфазном потоке понимание показаний зонда как полного давления не всегда справедливо), зонд – измеритель статического давления, электрозонд, фото-, видео- и киносъемка. Также измерялись интегральные характеристики потока (расходы фаз, импульс струи).

**Достоверность результатов исследования.** Достоверность экспериментальных данных обеспечивается поверкой и тарировкой аппаратуры, визуальным контролем. Достоверность расчетных результатов обусловлена строгим применением теории математического моделирования и подтверждается тестовыми расчетами,

согласованностью с экспериментальными результатами и качественным прогнозом картины течения, подтвержденным экспериментами.

**Научная новизна.** Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что:

- сформулирована ММ пространственного газокапельного соплового течения с учетом пленки, полидисперсности, столкновений и дробления капель при высоком (более 0.9) массовом содержании жидкости;
- впервые по такой модели проведено численное моделирование осесимметричного соплового газокапельного потока; результаты хорошо согласуются с экспериментом;
- получены новые экспериментальные данные о пространственной структуре потока; в частности, получены описание распределения и некоторые количественные данные о параметрах потока на входе в сопло, показано наличие зоны с малой концентрацией капель у стенки в расширяющейся части сопла в высококонцентрированном газокапельном потоке с пленкой.

**Практическая значимость результатов исследования.** Результаты численных экспериментов продемонстрировали возможность использования многожидкостной модели газокапельного потока для пространственных расчетов течений с большой долей дискретной фазы (жидкости) без ряда упрощающих предположений, при использовании которых теряется информация о некоторых особенностях течения (учитываются столкновения, аэродинамическое дробление капель, наличие пленки и массообмен с ней). Выявлены границы применения указанной модели, связанные с образованием в потоке зон, в которых объемная доля жидкости близка к 1.

Полученный комплекс экспериментальных данных позволяет использовать их для проверки других моделей высококонцентрированных газокапельных потоков.

Сравнение результатов численных экспериментов с результатами обработки данных зондовых измерений показало необходимость изменения как методики обработки экспериментальных данных, так и конструкции зонда. Предложена конструкция зонда, позволяющего одновременно измерять расходы фаз и полное давление газокапельного потока.

Созданная для ЭВМ программа расчета параметров газокапельного потока использовалась в ходе работ по созданию и совершенствованию газодинамических противопожарных систем различной мощности НИИ НТ МАИ и ООО «Темперо». В

частности, для РУПТ расчеты и эксперименты показали, что при изменении конструкции камеры смешения в широких пределах практически не меняется средний диаметр капель и дальнобойность струи. Предложена расчетно-экспериментальная методика анализа внутренней структуры потока и выбора направлений совершенствования опытной установки.

Экспериментальные методики использовались для исследования взаимодействия газокапельной струи с потоком от воздушного винта при создании системы пожаротушения вертолетного базирования.

Предлагаемая модель может также использоваться при моделировании работы систем нанесения противообледенительной жидкости, потоков в парогенераторах, газожидкостных эжекторах, химикотехнологических установках, устройствах резки металлов, бетона и т.п., а также в других устройствах, где гидродинамические процессы являются определяющими.

**На защиту выносятся:**

- физическая модель потока, полученная на основании численных и натуральных экспериментов;
- математическая модель пространственного газокапельного соплового течения с учетом пленки, полидисперсности, столкновений и дробления капель при высоком (более 10) массовом содержании жидкости;
- способ расчета потока, в котором необходимыми элементами являются учет области окружающего пространства у среза сопла, учет толщины пленки жидкости на стенке сопла и моделирование выхода пленки из сопла (в виде вдува со стенки в расчетную область);
- экспериментальные данные о пространственной структуре потока на входе и выходе из сопла;
- методика анализа результатов зондовых измерений параметров потока с большой долей капель;
- расчетно-экспериментальная методика анализа внутренней структуры течения и выбора направлений совершенствования сопловых устройств, предназначенных для получения высокоскоростных газокапельных потоков.

**Представление результатов работы.** Основные результаты исследований докладывались на XVII, XVIII, XIX и XX семинарах "Течения газа и плазмы в

соплах, струях и следах" (С.-Петербург, 1997, 2000, 2002, 2004), на III, IV и V международных (межд.) конференции (конф.) по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ) в Москве (2000), С.-Петербурге (2002) и Самаре (2004), на II и III Межд. симпозиумах "Актуальные проблемы механики сплошных и сыпучих сред" (Москва, 1999, 2000), на IV Минском межд. форуме «Тепло-массообмен ММФ-2000» (Минск, 2000), на межд. научной конф. «Двигатели XXI века» (Москва, 2000), на конф. «Fluid-particle interaction-VI» (Италия, 2002), на V межд. научно-технической конференции (нтк) «АВИА-2003» (Киев, НАУ, 2003), на 5-ой межд. конф. «Природные пожары: распространение, тушение и экологические последствия» (Томск-Красноярск, 2003), на 4-ой межд. конф. по инженерным и компьютерным технологиям «ЕСТ-IV» (Португалия, 2004), на 16-ом межд. симпозиуме по явлениям переноса «ISTP-16» (Прага, 2005), на 10-ой (Переяславль-Залесский, 1999) и 14-ой (Алушта, 2005) межд. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам «ВМСППС», на научно-методической конф., посвященной 50-летию кафедры "Теории воздушно-реактивных двигателей" МАИ (Москва, 1995), на 3-ем (Москва, 1996) и 4-ом (С.-Петербург, 1998) межд. аэрозольных симпозиумах «IAS», на Межд. нтк "Современные научно-технические проблемы гражданской авиации" (Москва, 1996), на XV научно-практической конф. «Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков» (Москва, 1999), на межд. нтк «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества» (Москва, 2003).

**Публикации.** Основные научные результаты работы опубликованы в 41 печатной работе, в том числе в 12 статьях.

**Структура работы:**

Работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка использованных источников из 247 наименований, списка условных обозначений и 28 приложений. В работе 130 рисунков, 12 таблиц. Объем работы составляет 342 страницы.

Диссертация написана в ходе выполнения фундаментальной НИР «Экспериментальное исследование и моделирование гетерогенных потоков в соплах и струях с высокой массовой долей капель или частиц», в которой автор являлся научным руководителем и ответственным исполнителем.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В 1-ой главе «Выбор параметров базового потока для экспериментального и численного исследования»** определяются характерные параметры потока, который будет основным объектом исследования. По результатам численного моделирования и экспериментальным данным получены критерии компактности газок капельной струи, что важно для прогнозирования струй систем пожаротушения, получены массовые расходы, профиль канала, давление, средние скорости фаз так называемого «базового» потока.

Критерием компактности будет служить заданное минимальное значение объемной концентрации частиц (капель), что соответствует понятиям "прозрачность", "видность" струи и позволяет сравнивать теоретические и экспериментальные данные непосредственно по результатам фото- и видеосъемки.

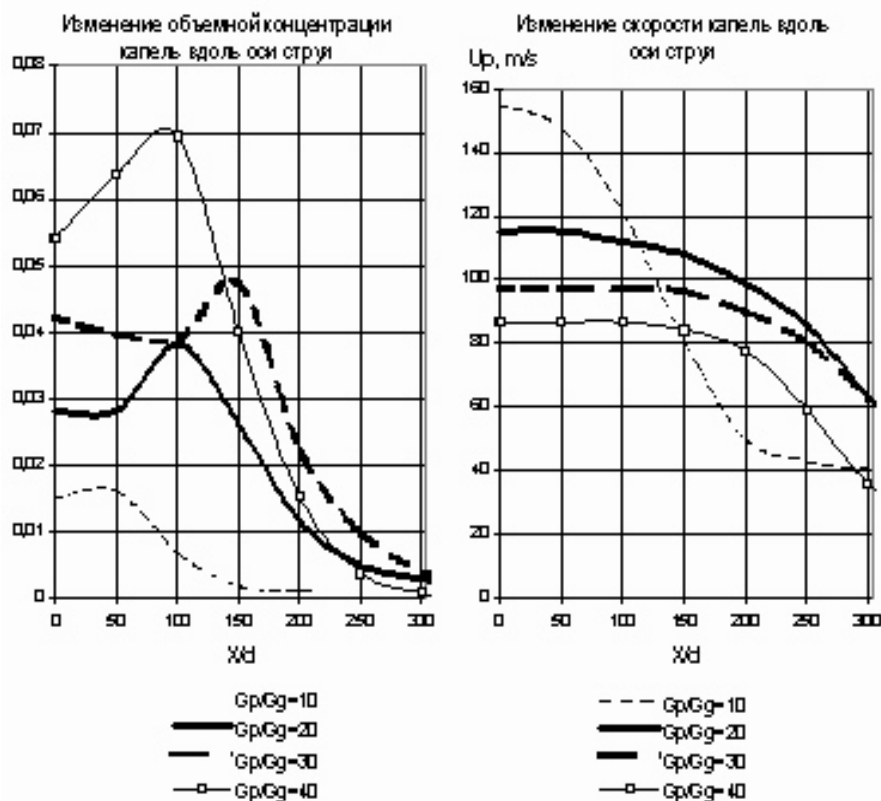
Анализ результатов расчетов позволяет сделать следующие выводы:

- из принятых к рассмотрению критериев, характеризующих компактность газок капельной турбулентной струи, наиболее важными являются массовая загрузка потока дискретной фазой  $G_p/G_g$  ( $G_p$  и  $G_g$  - массовые расходы газа и капель) и относительный диаметр частиц  $D_p/d$  ( $D_p$  - диаметр капли);

- получена интересная для практики (системы пожаротушения) оценка области отношений массовых расходов капель и газа ( $G_p/G_g \sim 30$ , рис.2), при которой дальность струи максимальна в магистралях.

Была проведена серия экспериментов (работа проводилась Воронежским

А.В. и др.) по исследованию



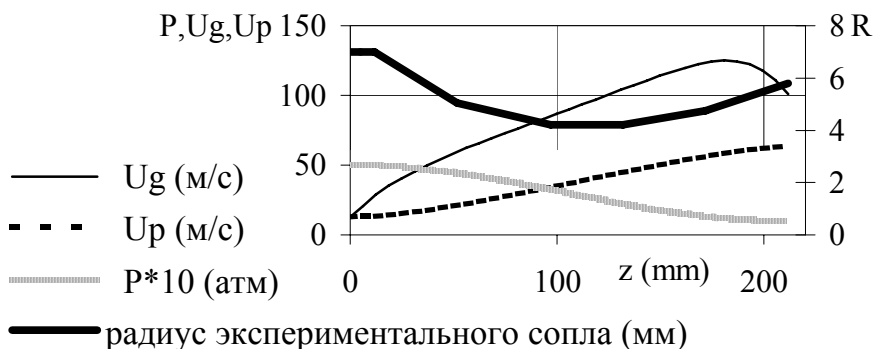
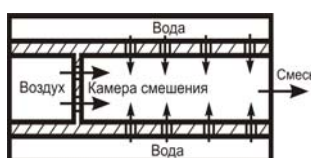
**Рис.2. Объемная доля и скорость капель вдоль оси струи в зависимости от  $G_p/G_g$ .**

дальнобойности газокapельных струй. Разброс точек вокруг аппроксимирующей экспериментальные данные кривой показывает, что наибольшая дальность получается при  $G_p/G_g$  в диапазоне 30-40, что соответствует расчетному результату.

Анализ статистики пожаров и экспериментальных данных ВНИИ ПО МЧС России показал, что при тушении наиболее массовых возгораний темп подачи жидкости должен быть порядка  $0.5 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , дисперсность капель у очага пожара  $\sim 150 \text{ мкм}$ , удаление оператора от очага до 5 м. Учитывая высокую эффективность мелкодисперсного тушения массовый расход жидкости принят  $0.4 \text{ кг/с}$ . Из-за ограничений, связанных с требованиями к ранцевым установкам пожаротушения, давление на входе в проектируемое сопло было принято равным 5 атм, а расход воздуха -  $13 \text{ г/с}$ . Для исследования был взят поток с этими параметрами («базовый» поток). Отметим, что мы оперируем размерными величинами, так как цель работы не в получении критериальных зависимостей, а в получении данных о структуре и параметрах соплового потока на основании численного и физического экспериментов, а также в проверке возможностей многожидкостной модели.

Для получения первого варианта профиля сопла использовалась одномерная монодисперсная модель двухфазного соплового течения с учетом скоростной и температурной неравновесности фаз и трения потока о стенки канала.

Схема камеры смешения



**Рис.3. Схема камеры смешения и полученные по одномерной модели параметры (P – давление газа,  $U_g$ ,  $U_p$  – скорость газа и капель, Z – расстояние вдоль сопла) и радиус R экспериментального сопла.**

Далее рассматриваются осесимметричные сопла, это объясняется особенностями конструкции камеры смешения (рис.3), технологическими ограничениями и опытом, полученным в ходе предыдущих исследований. На рис.3 показаны профили сопел: рассчитанное по одномерной модели и изготовленное.

В результате этой части работы получены основные параметры так называемого «базового» потока, созданы сопла для экспериментального исследования на специальном стенде.

**Во 2-ой главе «Математическая модель потока с учетом аэродинамического дробления капель, столкновений капель между собой и с пленкой. Метод**

**расчета»** приводится полная система уравнений ММ газокапельного потока в канале. Автором проведены оценки различных параметров потока, на основании чего в модели учитываются столкновения капель между собой и с пленкой, аэродинамическое дробление капель, теплообмен между каплями, газом и пленкой, действующие на каплю силы аэродинамического сопротивления и плавучести (Архимеда). Вязкость газа и жидкости учитывается только в процессе межфазного взаимодействия. Не учитываются сила тяжести, процессы внутри капли, теплообмен потока со стенкой канала, теплопроводность газа, излучение газа и частиц, фазовые переходы, выделение из воды растворенных в ней газов, турбулентность. Физические характеристики веществ полагаются постоянными. Справедливо уравнение состояния идеального газа.

**Основные уравнения математической модели.** Предполагается, что среда является многоскоростной и многотемпературной, то есть в каждой точке есть скорости и температуры как газа, так и капель; в характерном объеме капель достаточно много, чтобы рассматривать капли как сплошную среду (хаотическое движение капель не рассматривается). Все капли делятся на несколько групп с номерами  $i$  от 1 до  $N$  (деление проводится по диаметру на некоторый начальный момент, в процессе расчета скорость и диаметр капель каждой группы меняются во времени и пространстве). Взаимодействие между группами описано ниже.

Для некоторого объема, в котором поток характеризуется такими величинами, как скорость газа  $\mathbf{W}_g$  (жирным шрифтом выделены векторы), давление, температура и плотность газа, объемная концентрация газа  $\alpha_g$ , скорость капель  $\mathbf{W}_p$ , давление газа  $P_g$ , температура газа  $T_g$ , температура капель  $T_p$ , объемная концентрация капель  $\alpha_p$ , плотность вещества капель  $\rho_p$ , можно записать законы сохранения массы, импульса и энергии в интегральном виде.

*Уравнения сохранения массы:*

$$\partial \left[ \int (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot dv)_v \right] / \partial t = - \int (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot (\mathbf{W}_g \cdot \mathbf{n}) ds)_s, \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \partial[\int (\alpha_{p i} \cdot \rho_p \cdot dv)_v] / \partial t = \\ = - \int (\alpha_{p i} \cdot \rho_p \cdot (\mathbf{W}_{p i} \cdot \mathbf{n}) ds)_S + \int ([\Delta M_{small i} + \Delta M_{large i}] dv)_v, \quad i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (2)$$

$$\alpha_g + \sum (\alpha_p)_{i=1, \dots, N} = 1, \quad (3)$$

где  $t$  – время,  $\int (\dots)_v$  – интеграл по объему  $V$ , ограниченному поверхностью  $S$ ,  $\int (\dots)_S$  – интеграл по поверхности  $S$ ,  $\mathbf{n}$  – внешняя нормаль к поверхности  $S$ ,  $\Delta M_{small i}$ ,  $\Delta M_{large i}$  – изменение массы за счет столкновения с более мелкими и более крупными каплями.

*Уравнение сохранения импульса для газа:*

$$\begin{aligned} \partial[\int (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot \mathbf{W}_g \cdot dv)_v] / \partial t = - \int (P_g \cdot \mathbf{n} \cdot ds)_S - \int (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot (\mathbf{W}_g \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{W}_g \cdot ds)_S - \\ - \sum \{ \int (\alpha_{p i} \cdot \rho_p \cdot [\mathbf{F}_{comp i} + \mathbf{F}_{A i}] \cdot dv)_v \}_{i=1, \dots, N}, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\mathbf{F}_{comp i}$  – сила взаимодействия между каплями и газом, деленная на массу капли,  $\mathbf{F}_{A i}$  – сила Архимеда, деленная на массу капли, вызвана тем, что капля находится в переменном поле давления;

*Уравнение сохранения импульса для капель:*

$$\begin{aligned} \partial[\int (\alpha_{p i} \cdot \rho_p \cdot \mathbf{W}_{p i} \cdot dv)_v] / \partial t = - \int (\alpha_{p i} \cdot \rho_p \cdot (\mathbf{W}_{p i} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{W}_{p i} \cdot ds)_S + \\ + \int \{ [\alpha_{p i} \rho_p (\mathbf{F}_{comp i} + \mathbf{F}_{A i}) + (\Delta I_i + \sum (\Delta I_{fi})_{D_{pf} > D_{pi}})] dv \}_v, \quad \text{при } F_{if} > 0 \quad i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \partial[\int (\alpha_{p i} \cdot \rho_p \cdot \mathbf{W}_{p i} \cdot dv)_v] / \partial t = - \int (\alpha_{p i} \cdot \rho_p \cdot (\mathbf{W}_{p i} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{W}_{p i} \cdot ds)_S + \\ + \int \{ [\alpha_{p i} \rho_p (\mathbf{F}_{comp i} + \mathbf{F}_{A i}) + (\Delta I_i + \Delta I) / M_{new i}] dv \}_v, \quad \text{при } F_{if} < 0 \quad i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\Delta I_i$ ,  $\Delta I_{fi}$ ,  $\Delta I$  – изменение импульса капель в рассматриваемом объеме в результате столкновений,  $F_{if}$  – коэффициент эффективности соударений.

*Уравнение сохранения энергии газа:*

$$\begin{aligned} \partial[\int (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot E_g \cdot dv)_v] / \partial t = - \int (P_g \cdot (\mathbf{W}_g \cdot \mathbf{n}) \cdot ds)_S - \int (\alpha_g \cdot \rho_g \cdot (\mathbf{W}_g \cdot \mathbf{n}) \cdot E_g \cdot ds)_S - \\ - \sum \{ \int (\{ \alpha_{p i} \cdot \rho_p \cdot Q_{p i} + \alpha_{p i} \cdot \rho_p \cdot [(\mathbf{F}_{comp} + \mathbf{F}_A)_i \cdot \mathbf{W}_{p i}] \} \cdot dv)_v \}_{i=1, \dots, N}, \\ E_g = P_g / (\rho_g \cdot (\kappa - 1)) + \mathbf{W}_g^2 / 2, \end{aligned} \quad (7)$$

$\kappa$  – показатель адиабаты, а  $Q_{p i}$  – тепловой поток между газом и каплями.

Также в работе принято, что температура капель меняется по закону:

$$\begin{aligned} \partial[\int (\alpha_{p i} \cdot \rho_p \cdot C_{part} \cdot T_{p i} \cdot dv)_v] / \partial t = \\ = - \int (\alpha_{p i} \cdot \rho_p \cdot C_{part} \cdot T_{p i} \cdot (\mathbf{W}_{p i} \cdot \mathbf{n}) \cdot ds)_S + \int ([\alpha_{p i} \cdot \rho_p \cdot Q_{p i} + \Delta Q_i] \cdot dv)_v, \quad i=1, \dots, N \end{aligned} \quad (9)$$

где  $C_{part}$  – теплоемкость вещества капли,  $\Delta Q_i$  – теплообмен в результате столкновений капель. Т.о. в объеме  $V$  происходит осреднение температуры капель.

Для замыкания системы необходимы условия на границах. В качестве граничных условий, использовавшихся в большинстве случаев, были выбраны следующие:



- на входе в сопло известны все параметры потока;
- на открытой границе расчетной области (в эту область входит, помимо объема, ограниченного стенками сопла, зона у среза сопла, что позволяет использовать в качестве граничных условий более достоверные данные о параметрах окружающей среды, а не какие-либо предположения о параметрах на срезе) известны параметры окружающей среды, для других величин используется экстраполяция изнутри расчетной области, так называемый снос параметров;
- на оси и на жесткой стенке для газа и капель ставится условие непротекания;
- при наличии пленки ставятся специальные условия (см. ниже).

За начальные данные, соответствующие моменту времени  $t_0$ , чаще всего принимались параметры окружающей среды (атмосферные условия), а для капель задавались минимальные скорость (менее 0,1 м/с) и объемная концентрация ( $\sim 10^{-6}$ ).

Основным объектом в экспериментальных исследованиях и в практических приложениях является поток в осесимметричном сопле, поэтому для численного моделирования удобна цилиндрическая система координат. Подача газа и жидкости в сопло организована с максимальной осевой симметрией, поэтому в ММ поток полагается осесимметричным.

**Аэродинамическое сопротивление капель.** Для коэффициента сопротивления сферы  $Cd_0$  в равномерном потоке газа существуют различные формулы, однако в рассматриваемом диапазоне параметров ( $D_p < 500$  мкм,  $|U_g - U_p| < 100$  м/с) отличие этих формул невелико, поэтому в расчетах используется формула Клячко Л.С.

Для очень мелких капель используется поправка  $Cd_{Kn}$  на разреженность газа.

Так как в потоке капля по форме не совпадает со сферой, то для коэффициента сопротивления требуется поправка на деформацию капли  $C_{We}$ .

Также используются поправка на сжимаемость газа  $Cd_{press}$ , так как в некоторых зонах или на некоторых режимах скорость газа может приближаться или даже превосходить скорость звука, и поправка на взаимовлияние капель  $C_{ap}$ , так как известно, что присутствие других капель меняет силу сопротивления, причем эта поправка определяется неоднозначно. Автором был проведен выбор нужного значения поправки.

**Модель пленки, текущей по стенке сопла.** При высокой концентрации капель, если не принимать специальных мер, неизбежно выпадение части жидкости на стенку в

виде пленки. В работе принято, что стенка сопла абсолютно смачиваемая и пленка течет сплошным слоем до среза сопла. В связи с этим не рассматриваем модели и экспериментальные данные о взаимодействии капель с не смоченной поверхностью.

Предполагается использование экспериментальных данных о зависимости коэффициентов трения и теплообмена от средних характеристик пленки, поэтому рассматривается только одномерное течение пленки.

С течением времени на участке между двумя поперечными сечениями изменение массы пленки произойдет за счет втекания жидкости слева, вытекания справа, выпадения капель из потока, отражения части ударившихся о пленку капель и срыва капель с гребней поверхностных волн. Изменением объема жидкости за счет испарения, растворения или выделения газов пренебрегаем.

Импульс пленки меняется за счет притока-оттока массы с соответствующей скоростью, а также из-за перепада давления и сил трения (пренебрегаем массовыми силами, так как они значительно меньше сил трения и сопротивления). Предполагается, что сорванные газом капли имеют скорость пленки. Нормальные составляющие скорости отскочивших и сорванных капель не учитываются в уравнениях пленки, но их надо учитывать в уравнениях для капель. Также принято, что работа силы трения между пленкой и газом идет в газ, стенка теплоизолирована, работа сил трения не влияет на температуру пленки.

Основная проблема в такой модели пленки – определение коэффициентов трения, теплообмена, отражения капель и уноса жидкости газом. Исследования в этой области весьма обширны, но касаются, в основном, трубных течений или потоков на плоскости, поэтому требует проверки возможность использования этих результатов в рассматриваемых потоках. Такая проверка была сделана автором.

Для описания взаимодействия капель и пленки используется модель, применяемая в пакете FlowVision, дополненная данными о скорости выбитых из пленки капель. Автором проведено сравнение этой модели с моделью Шрайбера А.А. и др.

Для определения количества и параметров сорванных газом капель в расчетах использовалось соотношение, полученное экспериментально.

**Описание модели столкновения капель.** Экспериментально процессы столкновения капель исследовались достаточно широко, см., например, книгу Стернина Л.Е. и Шрайбера А.А. (1994). В результате стало ясно, что при

столкновении капли или сливаются, или отскакивают друг от друга, или образуется несколько капель новых диаметров. Так как для моделирования потока в работе используется модель взаимопроникающих сред, то надо использовать соответствующие указанным сценариям столкновений экспериментальные зависимости, дающие средние характеристики множества похожих столкновений.

В ряде работ обращалось внимание на то, что в процессе столкновений возрастает скорость вращения капель, поэтому движение капель определяется не только силой аэродинамического сопротивления, но и вращением. Однако, в первом приближении, в работе *вращение капель не учитывалось*.

Рассматриваем только *парные столкновения* в некотором объеме газок капельного потока, когда друг с другом сталкиваются только две капли. Более крупную каплю условимся называть *мишенью*, мелкую – *снарядом*. Процесс столкновения можно представить следующим образом. За некоторый интервал времени при относительно малой скорости сближения часть снарядов полностью сливается с мишенями, а часть испытывает касательные столкновения, при которых снаряд теряет часть импульса ( $\beta_f$  – коэффициент потери импульса). При относительно высокой скорости часть снарядов испытывает касательные столкновения с потерей импульса, а часть – выбивает из мишени несколько осколков и отскакивает сама. Осколки как бы отваливаются от мишени, которая за счет удара ускоряется. Отскочивший снаряд теряет при этом часть импульса. В данной схеме столкновений, с одной стороны, не учитываются во всей полноте данные о дисперсном составе осколков, с другой стороны, здесь нет неопределенности с импульсом снарядов, осколков и мишени.

Вероятность столкновения капель учитывается коэффициентом захвата  $e_{if} < 1$ . Исход столкновений, которые могут закончиться либо слиянием взаимодействующих капель, либо дроблением крупной капли, описывается коэффициентом эффективности соударений  $F_{ij}$ , представляющим собой математическое ожидание отношения изменения объема крупной капли (мишени) группы  $i$  к суммарному объему столкнувшихся с ней в течение некоторого времени мелких капель  $j$ .

Коэффициенты  $\beta_f$ ,  $e_{if}$  и  $F_{if}$ , входящие в выражения для определения параметров капель при их слиянии и дроблении, рассчитываются по эмпирическим формулам. Индекс  $f$  относится к крупной капле, а индекс  $i$  – к мелкой, т.е.  $D_{pf} > D_{pi}$ .

**Аэродинамическое дробление капель.** Модель аэродинамического дробления капель строится в работе на основании анализа, проведенного в книге Стернина Л.Е. и Шрайбера А.А., из которого видно, что капля дробится не мгновенно, а по истечении некоторого времени  $\tau_{\text{дробление}}$  после начала силового воздействия, причем при  $We < We_{\text{критическое}}$  капля не дробится. Если  $\tau_{\text{дробление}} < \tau_{\text{свободн пробега}}$ , то капля дробится, в противном случае этого не происходит, при этом всё равно сохраняется некоторый произвол в выборе  $We_{\text{критическое}}$ . Фактически аэродинамическое дробление ограничивает максимальный диаметр капель.

**Метод расчета.** При численном способе определения характеристик потока интересующая нас область разбивается на части так называемой расчетной сеткой, для каждой ячейки которой справедливы уравнения ММ. В данную расчетную область входит, помимо объема, ограниченного стенками сопла, зона у среза сопла, что позволяет использовать в качестве граничных условий достоверные данные о параметрах окружающей среды. Для определения параметров потока в ячейках расчетной сетки в работе используется метод «крупных частиц», при этом принято, что параметры потока внутри каждой ячейки распределены равномерно.

Для удобства граница расчетной области проходит не по стенке канала, а по кривой, сглаживающей поверхность пленки. Пробные расчеты показали, что не имеет смысла подправлять сетку на каждом расчетном шаге, поэтому сначала расчет проводился практически до стационарного решения без поправки сетки; затем по полученной толщине пленки строилась подходящая гладкая кривая, исправлялась сетка, и расчет продолжался далее до стационарного решения; по вновь полученной толщине пленки строилась новая кривая и сравнивалась со старой: если отличие в толщине превышало заданную точность, то расчет продолжался.

**Моделирование выхода пленки из сопла.** В зоне вытекания пленки из сопла полагается, что она мгновенно дробится на капли известного диаметра. Такой поток капель втекает извне в рассматриваемую расчетную область со скоростью пленки. В работе не ставилась задача точно смоделировать распад пленки, а было важно просто оценить явление, чтобы понять, насколько сильно пленка влияет на поток у среза сопла. Для максимального соответствия физической картине потока  $\alpha_p$  (объемная концентрация) должно стремиться к 1, поэтому у кромки сопла образуется зона X, в которой  $\alpha_p$  превышает величину «плотной упаковки сфер», то есть модель потока не

соответствует физической картине течения. В рамках используемой ММ это несоответствие, в первую очередь, проявляется в неверной силе сопротивления, поэтому в зоне X использовались формулы, учитывающие уменьшение продольной и увеличение поперечной составляющих силы сопротивления капель.

В итоге в работе была сформулирована ММ газокапельного соплового потока с большой долей капель и с учетом пленки, аэродинамического дробления и столкновений капель.

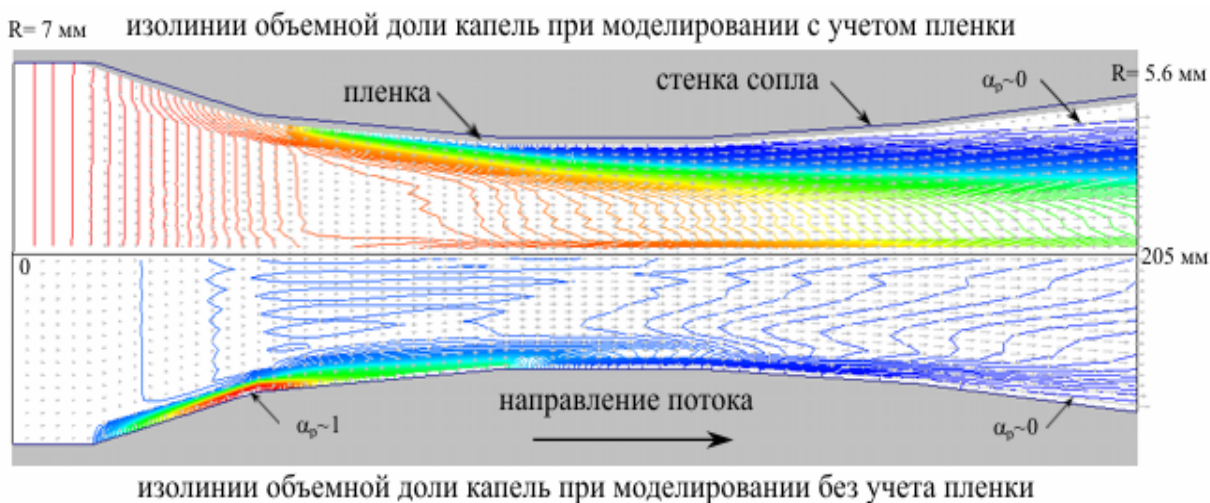
**В 3-ей главе «Выбор расчетной сетки. Анализ вариантов математической модели. Проведение тестовых расчетов»** проводилась проверка возможностей модели на примере потока в экспериментальной установке и на экспериментальных данных о максимально близких к «базовому» потоках других исследователей.

В большинстве экспериментов с соплами (каналами переменного сечения), в которых течет газокапельный поток и велика массовая доля дискретной фазы (более 10), определяются только средние характеристики, а именно: расходы фаз, тяга, распределение давления вдоль стенки канала. По этим данным можно определить средние скорости газа и жидкости. Результаты моделирования двух экспериментов (Селиванов и др., 1975, ХАИ; Lemonnier H. и Selmer-Olsen S., Int. J. Multiphase Flow, 1992), наиболее близких к базовому варианту данной работы (см. гл.1), показали неплохое соответствие расчета и эксперимента.

Для потока с базовыми характеристиками был получен максимальный объем экспериментальных данных в ходе создания ранцевой установки пожаротушения (РУПТ). Большая доля экспериментальных и расчетных результатов изложена в работах /2,3,9,15,23-28,36-38/. Важно то, что здесь были получены данные об изменении некоторых характеристик потока вдоль радиуса вблизи среза сопла.

Численное моделирование потока с базовыми характеристиками с использованием монодисперсного варианта модели гл.2 без учета пленки /3,14,20,22/ показало, что важно знать распределение параметров по радиусу на входе в сопло, от которого существенно зависят параметры на выходе. Общая картина течения приведена на рис.7 (нижняя половина рисунка). Четко проявилась необходимость учета пленки жидкости на стенке, так как в зоне, где  $\alpha_p \rightarrow 1$ , расчет явно противоречит реальному характеру течения, и, кроме того, по данным экспериментов (рис.18), в пристенной области на выходе из сопла находится свыше 50% жидкости.

Автором были проведены расчеты по предлагаемой модели с использованием различных вариантов модели пленки и коэффициентов трения, при этом на входе в сопло задавалось равномерное распределение параметров «базового потока». Учет пленки позволил избавиться от зоны с нереальной объемной долей капель (рис.7).



**Рис.7 Сравнение результатов расчетов с учетом (вверху) и без учета (внизу) пленки. Цветовая шкала соответствует спектру белого света (радуга), красный цвет – максимальное значение величины, синий – минимальное.**

Расчеты показали, что можно численно за приемлемое время получать параметры потока при большой концентрации капель. Сопоставление расчетных результатов с экспериментальными данными показывает, что есть хорошее совпадение по средним скоростям и по давлению вдоль сопла. В частности, модель «видит» такие явления, как «запирание сопла» и значительное перераспределение жидкости поперек канала. Это дает основание использовать вышеизложенную модель для анализа процессов внутри сопла. Приведенные в этой главе расчетные результаты ближе к экспериментальным данным, чем те, что получены по модели без учета пленки.

Данные проведенных расчетов позволили провести оценку характерных времен основных процессов, происходящих с каплей, при этом использовались формулы из работ А.Л.Стасенко и др., И.М.Васенина и др.

Оценка времени свободного пробега капель для базового варианта показывает, что нельзя пренебрегать столкновениями капель, если от расчета требуются приемлемые пространственные количественные характеристики потока. Из оценок времени теплообмена газ-капля следует, что реальный тепловой поток будет меньше расчетного, то есть капли будут остывать, а газ нагреваться медленнее, поэтому и скорости фаз будут меньше. Сопоставление времени пребывания капли в канале и

характерных времен различных процессов показывает, что вполне оправдано пренебрежение излучением, испарением, тепловыми процессами внутри капли.

В итоге на этом этапе работы были определены задачи, решение которых составило суть дальнейших исследований:

- на основании численных экспериментов надо получить детальную картину течения в канале и выяснить влияние конструкции камеры смешения на поток;
- необходимо получить экспериментальные данные о структуре потока (распределении параметров потока по сечению) на входе в сопло и на выходе.

**В 4-ой главе «Численное исследование газочапельного соплового течения и начального участка выходящей из сопла струи»** рассказывается о проведенных автором численных экспериментах по исследованию структуры «базового» газочапельного потока.

#### **Экспериментальная оценка параметров потока на входе в сопло.**

В предыдущих расчетах и работах /3,14,20,22/ о распределении параметров фаз на входе в сопло можно было только догадываться из анализа конструкции камеры смешения, поэтому чаще всего полагалось, что все характеристики распределены равномерно поперек сопла. Однако для численного моделирования параметры потока на входе в сопло просто необходимы. Здесь надо знать:

- есть ли пленка на входе в сопло;
- как сильно поток отличается от равномерного.

С использованием модели «фиктивного газа» и тестовых частиц в работе были получены данные для температур газа и капель после камеры смешения /14/, которые показали, что на входе в сопло температуры воды и воздуха практически равны.

Для уточнения физической модели потока и получения дополнительных данных, было проведено фотографирование потока на входе в сопло. Для этого водовоздушная смесь подавалась от камеры смешения в сопло через канал с прозрачными стенками. Анализ фотографий показал, что сколько-нибудь существенная пленка в канале отсутствует (толщина пленки соизмерима с размером дискретных включений потока). Можно оценить размер капель у стенки на входе в сопло: он составляет  $\sim 150$  мкм. На рис. 8 показаны возможные профили продольных скоростей газа ( $U_g$ ) и капель ( $U_p$ ) и объемной концентрации капель  $\alpha_p$  с учетом

величины средней скорости на входе в сопло и слабой прозрачности потока непосредственно у стенок канала.

### Расчет параметров соплового течения без учета процессов в камере смешения

В работе было проведено численное моделирование потока с использованием соответствующего эксперименту распределения параметров на входе в сопло (рис.9).

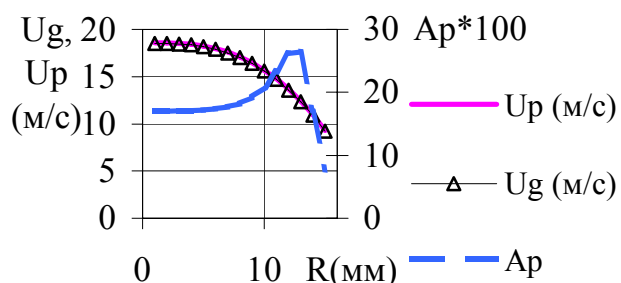


Рис.8. Возможное распределение скорости газа ( $U_g$ ), каплей ( $U_p$ ) и объемной доли каплей ( $A_p$ ) по радиусу на входе в сопло

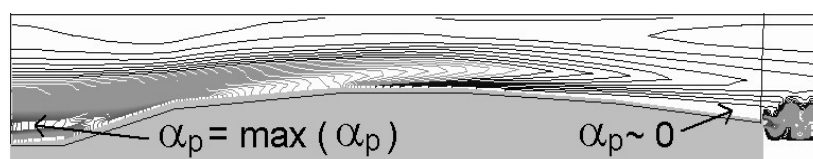


Рис. 9. Изолинии объемной доли каплей. Верхняя кромка рисунка — ось сопла, ломаная линия на сером фоне внизу рисунка — стенка сопла.

*Слабая зависимость дисперсности потока на выходе из сопла от дисперсности после камеры смешения.*

На выходе из сопла исследовалась зависимость дисперсности потока от крупности каплей на входе. Сравнение изолиний объемной доли каплей при минимальном (250 мкм) и максимальном (1450 мкм) «базовых» диаметрах показало, что диаметр каплей слабо влияет на характер распределения жидкости в потоке и на средние характеристики течения.

Однако если проанализировать изменения среднего и максимального диаметров каплей, определенных в отдельных точках течения, то при малом «базовом» диаметре преобладает слияние каплей. С ростом «базового» диаметра максимальный диаметр каплей растет до определенного предела, т.е. в какой-то момент времени дробление начинает преобладать над слиянием и фронт дробления занимает практически все сечение сопла. Таким образом, верхняя граница диаметров каплей определяется гидродинамикой потока.

*Изменение давления вдоль радиуса струи у среза сопла и устойчивость пленки в длинном сопле.*

Расчеты показывают, что в зоне повышенного содержания жидкости у среза должно быть повышенное по сравнению с окружающей средой давление (рис.10).



Объяснить это можно тем, что срывающаяся с кромки сопла пленка дробится на протяжении нескольких сантиметров, а в зоне распада фрагментов пленки на капли давление слегка повышается, так как газ тормозится в облаке капель из пленки. Поскольку распадающаяся пленка образует своеобразный экран, то давление газа в центральной части струи может отличаться от окружающего (атмосферного).

Характер изменения расхода жидкости в пленке (рис.11) показал, что, начиная с некоторого сечения в сужающейся части канала, масса жидкости меняется слабо, несмотря на постоянный рост скорости газа (до  $M \approx 0.9$ ), то есть пленка весьма устойчива при дозвуковых скоростях газа и смачиваемой стенке.

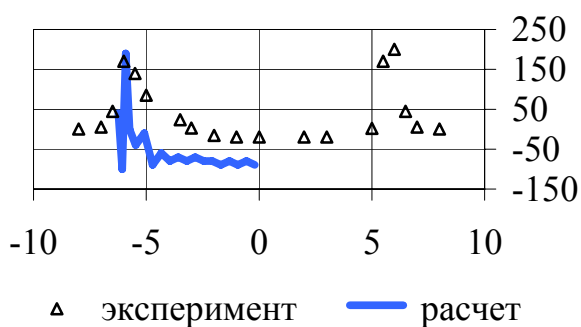


Рис.10. Изменение давления (вертикальная ось) вдоль радиуса (горизонтальная ось, мм) у среза сопла по результатам расчета и эксперимента.

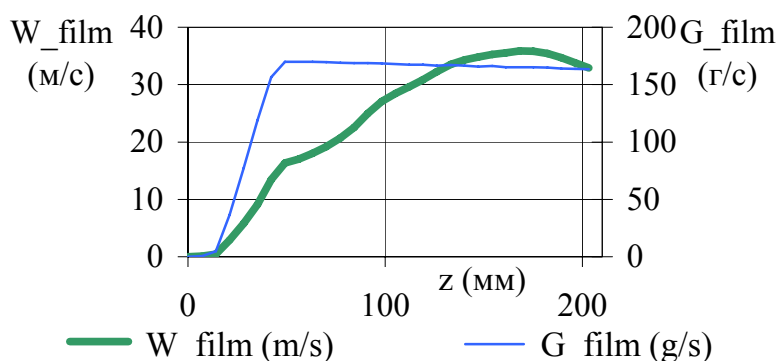


Рис.11. Изменение скорости ( $W_{film}$ ) и массового расхода жидкости в пленке ( $G_{film}$ ) по результатам расчетов.

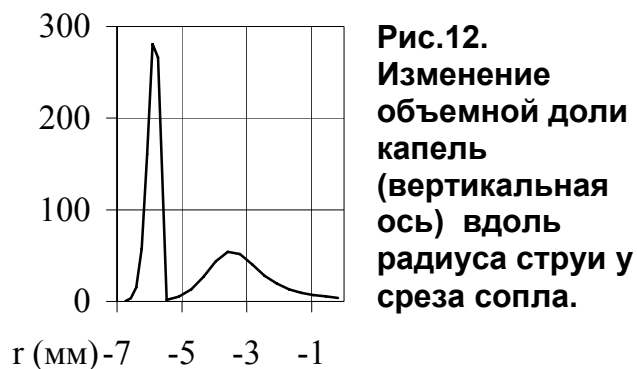
*Прогнозирование поведения жидкости на границе струи у среза сопла по результатам расчета*

Из теории известно, что вытекающая из канала кольцевая пленка распадается в результате резонансных колебаний. Для определения периода этих колебаний (для трубы диаметром  $D$  оценка периода колебаний  $T$ , при постоянной по сечению скорости звука  $a_{зв}$ , есть  $T/2=D/a_{зв}$ ) и скорости пленки в работе использовалась методика Федотовского и др., учитывающая разность скоростей и объем фаз. Период  $T$  использовался для определения поперечной скорости капель  $W_{p,t}(t)$  при моделировании колебаний пленки на выходе сопла. При использовании данных расчета частота ( $1/T$ ) составила  $\approx 3900$  Гц. Видно (рис.17), что расстояние между гребнями увеличивается на начальном участке струи, то есть жидкость из пленки разгоняется.

## О локальных экстремумах распределения жидкости вдоль радиуса у среза сопла.

Проведенные расчеты показали, что максимумы импульса и плотности орошения связаны с пленкой, при этом есть заметная неоднородность в ядре потока (рис.12,18). Однако существуют механизмы выравнивания параметров поперек потока в ядре: это поперечная диффузия каплей из-за столкновений (в работе не рассматривается), а также колебания в камере смешения. Эти колебания связаны с тем, что направленные к оси струйки жидкости образуют сгустки (крупные фрагменты жидкости), которые не могут быть устойчивы в рассматриваемом потоке. Ниже проведена расчетная проверка влияния колебаний на параметры у среза сопла.

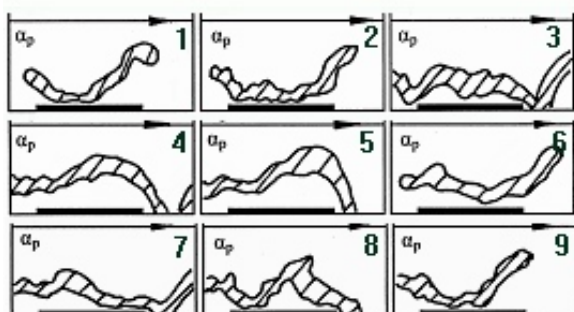
На рис.12 видно, что в расширяющейся части сопла у стенки, как и при малой доле капель (частиц), существует область, где концентрация капель значительно ниже, чем средняя по потоку. Существует эта зона при высокой массовой доле жидкости и относительно толстой пленке потому, что в расширяющейся части сопла резко падает интенсивность выпадения капель в пленку, а интенсивность уноса капель недостаточно высока.



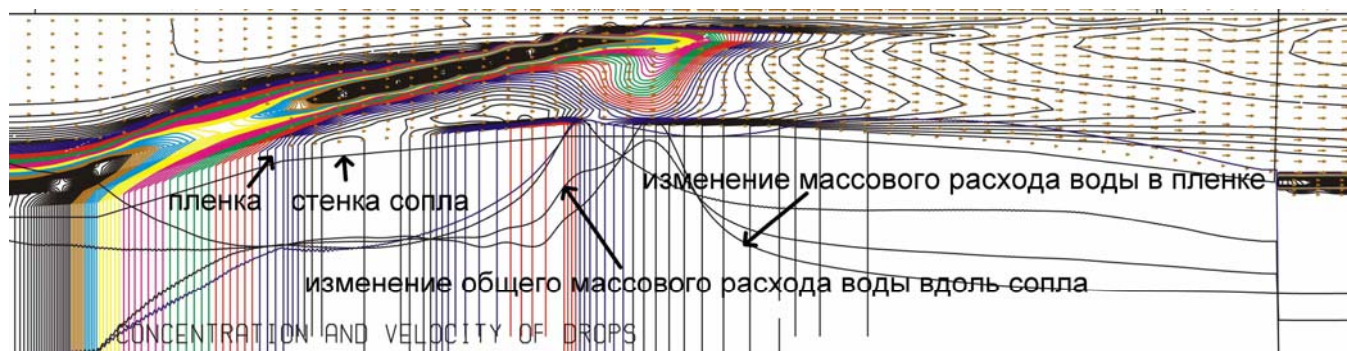
## Колебания потока в камере смешения

В экспериментальной установке при исследовании потока с «базовыми» характеристиками использовалась камера (рис.2) с подачей воды через множество отверстий на стенках и подачей воздуха через кольцевое сопло. Для получения большей ясности о работе камеры было проведено численное моделирование.

Расчеты показали, что в камере реализуется периодический по времени процесс изменения параметров фаз (рис.13). Видно, что в выходном сечении максимум  $\alpha_p$  смещен к стенке, причем положение максимума  $\alpha_p$  периодически меняется. Такая структура подтверждается анализом фотографий потока в прозрачном канале между камерой смешения и соплом.



С учетом полученных данных о потоке на входе в работе было проведено численное моделирование соплового течения. Колебания в камере смешения задавались изменением радиальной координаты максимума объемной доли капель относительно среднего на входе в сопло по синусоидальному закону, а расходы фаз полагались постоянными, то есть скорости фаз в поперечном сечении изменялись в соответствии с положением максимума  $\alpha_p$ . Расчеты показали, что ниже по потоку возникают колебания расходов фаз (рис.14), в потоке формируются своеобразные аэрозольные «пробки», периодически выбиваемые из сопла и вызывающие колебания угла раскрытия струи. Колебания поднимают среднее давление вдоль канала (рис.15), снижая эффективность разгона капель и сглаживая параметры в ядре потока (рис.18).



**Рис.14. Изолинии объемной доли капель (виден темный «язык» повышенной концентрации) и изменение массового расхода жидкости вдоль сопла (один из шагов расчета).**

В рассматриваемых потоках, по данным численного моделирования:

- 1) верхняя граница диаметров капель определяется гидродинамикой потока, а не дисперсностью на входе;
- 2) пленка весьма устойчива при дозвуковых скоростях газа;
- 3) в зоне повышенного содержания жидкости у среза сопла повышенное, по сравнению с окружающей средой, давление;
- 4) в расширяющейся части сопла у стенки существует область, где объемная доля капель значительно ниже, чем средняя по потоку;
- 5) жидкость из распадающейся в результате резонансных колебаний пленки разгоняется на начальном участке струи;
- 6) параметры потока колеблются из-за особенностей смешения жидкости и газа.

Все вышеперечисленные свойства потока допускают, с одной стороны, прямую или опосредованную экспериментальную проверку, с другой стороны, помогают выбирать направления совершенствования сопла и камеры смешения.

Проведенные расчеты показали, что для проверки модели, кроме расходов фаз, импульса потока на срезе сопла (тяга сопла) и изменения давления вдоль стенки канала, необходимо иметь данные о распределении и параметрах газа и жидкости поперек потока в канале и на начальном участке струи. Численные и экспериментальные исследования автора позволили получить такие данные о потоке.

Также расчеты показали, что для прогнозирования и объяснения поведения, компактности газокапельной струи необходимо рассматривать систему «камера смешения + сопло + начальный участок струи».

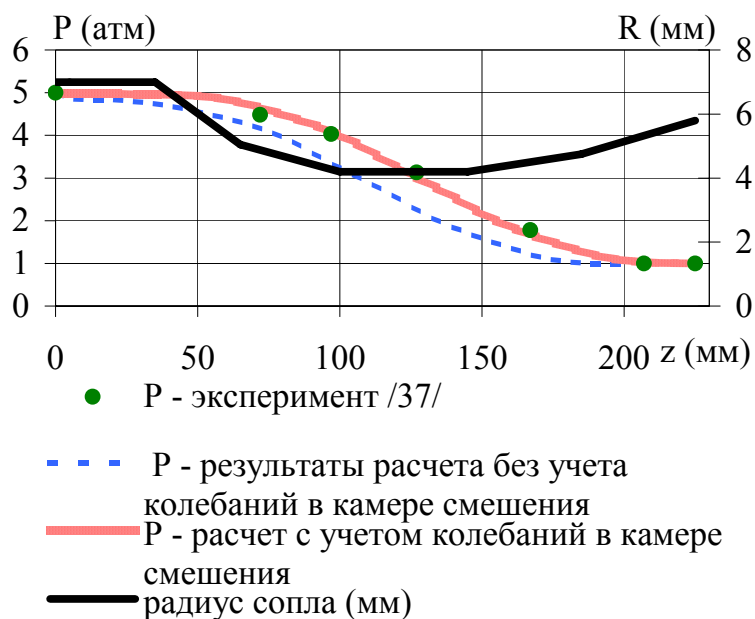
Следующей задачей стала экспериментальная проверка результатов расчетов и получение данных о пространственной структуре реального потока у среза сопла.

### **В 5-ой главе «Экспериментальная проверка результатов численного исследования газокапельного потока в канале и на начальном участке струи»**

приводятся данные проведенных автором и другими исследователями натурных экспериментов, подтверждающие численные результаты. В соответствии с целью работы эти данные, с одной стороны, позволяют получить описание внутренней структуры и выделить основные особенности взаимодействия фаз в газокапельном сопловом течении при значительном (более 10) массовом содержании жидкости, с другой стороны, показывают возможности многожидкостной модели в этой области. Дело в том, что полноценный физический эксперимент трудоемок и требует создания специальных средств измерения и обработки, поэтому в данной работе численный и физический эксперименты дополняют друг друга.

**Сравнение расчетных и экспериментальных средних характеристик потока.** Для «базового» и близких к нему потоков на специально оборудованном стенде проводилось измерение средних характеристик, а именно: тяги сопла (импульса струи на срезе сопла), расходов воды и воздуха, температуры воды на входе и выходе из сопла, изменения давления вдоль стенки сопла. Сравнение расчетных и экспериментальных величин для «базового» потока приведено на рис.15 и в таблице. То, что расчетные величины больше экспериментальных, является следствием заниженных потерь на трение (в случае завышенного коэффициента

аэродинамического сопротивления скорость газа была бы еще больше) и завышенного теплообмена между фазами. Справедливость этого пункта подтверждается экспериментами Нигматулина Р.И. (ТВТ, 1992), в которых отмечен рост сопротивления при пульсациях расхода. Выбор более точных коэффициентов качественно не меняет результатов, но требует достаточно сложной экспериментальной проверки, поэтому в данной работе эта проблема не рассматривалась.

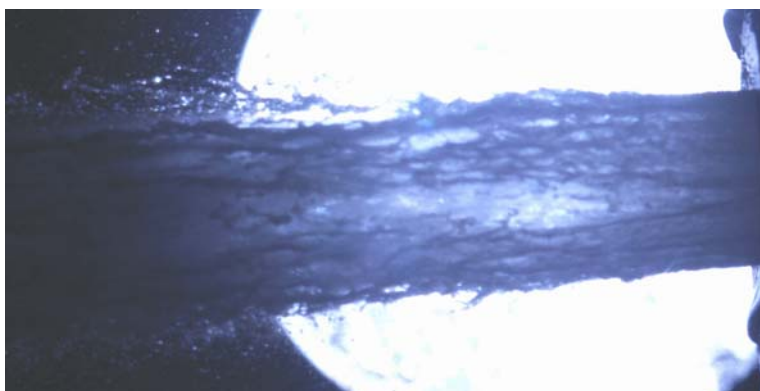


**Рис.15. Результаты измерения давления ( $P$ ) вдоль стенки сопла.**

**Таблица**  
**Суммарный импульс и средние скорости воды и воздуха на срезе сопла.**

	$W_g$ (м/с)	$W_p$ (м/с)	Тяга (Н)
Экспериментальное значение	110	57	24
Расчет, равномерное распределение фаз на входе в сопло	141	64.1	26.5
Расчет, распределение фаз на входе в сопло соответствует рис.9	126	65.5	27.5

**Пленка у среза сопла.** Для изучения пленки было проведено фотографирование струи у среза сопла в свете вспышек разной длительности. Типичные фотографии в свете вспышки  $10^{-6}$  с см. рис.16, а в свете вспышки  $4 \cdot 10^{-4}$  с см. рис.17. Видно, что на границе потока при выходе из канала летит распадающаяся на фрагменты жидкая пленка. Это подтверждает полученный численно вывод об устойчивости пленки при дозвуковых скоростях воздуха на смачиваемой поверхности в рассматриваемых газок капельных потоках с высокой концентрацией капель.



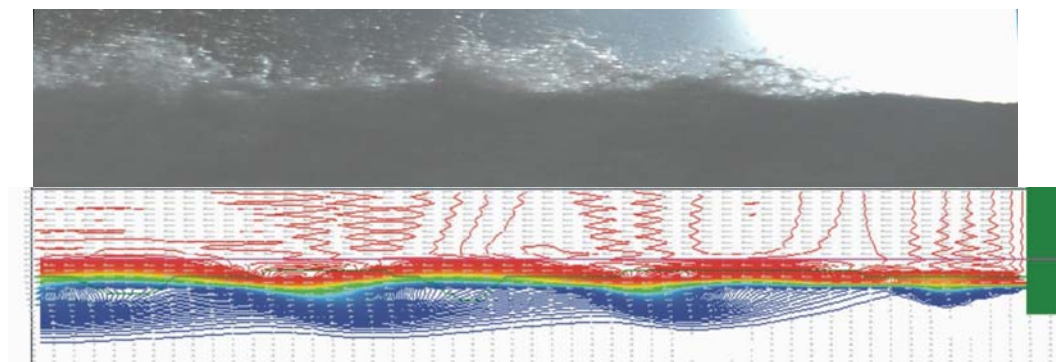
**Рис.16. Струя у среза сопла (сопло справа, время вспышки  $10^{-6}$  с).**

По трекам в работе определены скорость и угол разлета некоторых капель. Скорость находится в диапазоне от 4 до



34 м/с, угол – до  $17.5^\circ$ . Наблюдаемые капли образованы из пленки, поэтому можно считать, что скорость пленки близка к максимальной скорости капель, то есть  $\approx 34$  м/с (по расчету 33 м/с, см. рис.12).

На рис.17 хорошо видно волнистую границу струи. Симметричная картина колебаний подтверждает достаточно хорошую осевую симметрию потока. Расстояние между гребнями волн увеличивается по мере удаления от среза сопла, то есть жидкость разгоняется, так как, с одной стороны, отсутствует трение пленки о твердую стенку, с другой стороны, ориентированные по потоку фрагменты



**Рис.17.**  
**Сопоставление**  
**полученной в**  
**численном**  
**эксперименте**  
**границы**  
**капельной струи**  
**с результатами**  
**фотосъемки.**

(кластеры) жидкости имеют меньшую силу сопротивления, чем волны и получающиеся из пленки капли.

Роль колебаний в распаде пленки, а, следовательно, в процессе смешения газокapельной струи с окружающим воздухом достаточно очевидна. По рис.17 видно, что колебания идут с нарастающей амплитудой, то есть имеет место резонанс. Следовательно, это собственные колебания выходящего из сопла потока. Очевидно, что скорость передачи колебаний связана со скоростью звука. По результатам эксперимента эквивалентная скорость звука на срезе сопла составила  $\approx 45$  м/с, а частота, соответственно, 3916 Гц. Сопоставление расчета и эксперимента (рис.17) показывает хорошую точность прогноза колебаний, и подтверждает полученный численно вывод о том, что жидкость из распадающейся в результате резонансных колебаний пленки разгоняется на начальном участке струи.

Периодически меняется (от  $0^\circ$  до  $9^\circ$ ) угол раскрытия струи (это угол между внешней границей пленки и осью симметрии сопла). Это подтверждает расчетные результаты о колебаниях параметров потока из-за особенностей процесса смешения жидкости и газа и связи колебания угла раскрытия струи с выносом аэрозольных «пробок» из сопла.

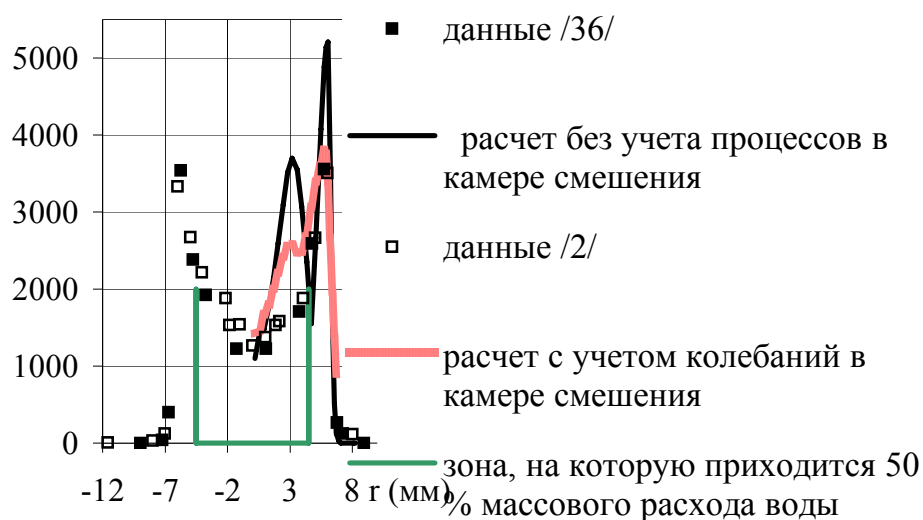
**Зондовые измерения.** Исследуемый поток оптически плотный, поэтому для получения параметров потока у среза были использованы: зонд I типа

(пробоотборник), зонд II типа (измеритель статического давления), зонд III типа (измеритель полного давления набегающего потока), зонд IV типа (электронзонд).

Зонды I и III типов объединены в один трубчатый зонд, который работает в двух режимах - измерения массовой концентрации дисперсной фазы и измерения полного давления гетерогенной среды. На рис.18 показаны результаты зондовых измерений плотности орошения по данным /2,23,36,38/. Измерения проводились в сечении на расстоянии 1 диаметр от среза сопла. Сопоставление численных и экспериментальных результатов показало высокую точность прогноза структуры струи и хорошее количественное совпадение расчетных и экспериментальных данных. Хотя подбором коэффициентов трения и параметров на входе в сопло можно добиться лучшего совпадения с экспериментальными данными, но, учитывая

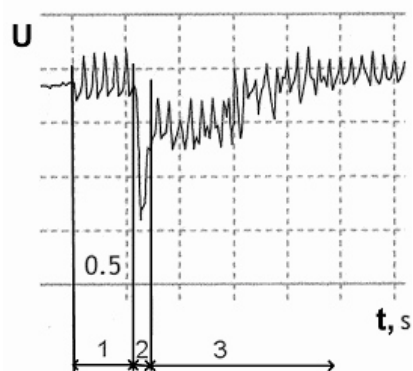
возможную потерю универсальности коэффициентов трения, в таком повышении точности нет смысла.

**Рис.18. Сравнение плотности орошения (Gp/S, вертикальная ось) вдоль радиуса (горизонтальная ось) у среза сопла по расчетам и экспериментам.**



Результаты численного моделирования показывают (рис.12,18), что в расширяющейся части сопла, у стенки, существует область шириной ~ 2 мм, где мала объемная доля капель. На первый взгляд, это противоречит результатам зондовых измерений, поэтому была проведена проверка с использованием меньшего, чем зонд I типа, электрического зонда (IV типа). Зонд состоит из двух изолированных электродов, у которых проводимы только торцы. Если между торцами образуется жидкая перемычка, то цепь замыкается и сигнал на потенциометре максимальный. Чем меньше жидкости между электродами, тем меньше уровень сигнала. Эксперимент показал, что действительно существует узкая область, где жидкости практически нет (область 2 резкого падения напряжения U на рис.19). Также расчеты показывают, что в зоне повышенного содержания жидкости у среза должно быть

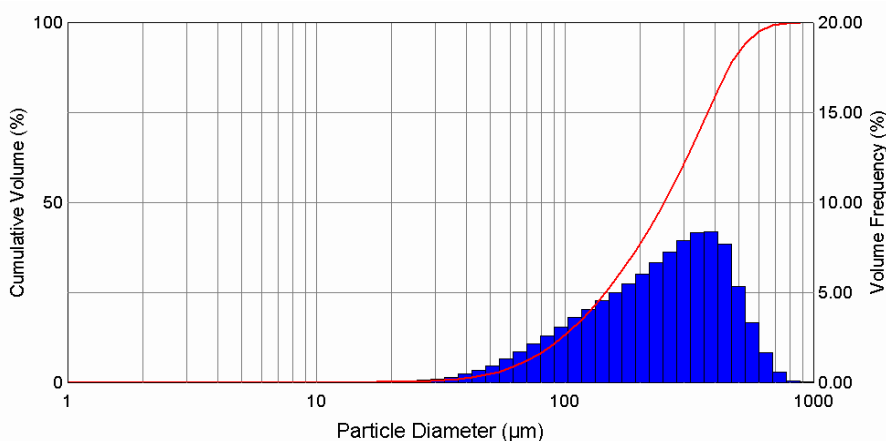
повышенное по сравнению с окружающей средой давление. Для проверки были



выполнены специальные измерения зондом II типа – измерителем статического давления, которые показали правильность прогноза (рис.10).

**Рис.19.** Изменение напряжения  $U$  (вертикальная ось) при движении влажного зонда в поток на глубину  $\sim 5$  мм. Горизонтальная сторона ячейки соответствует 0.5 с. 1 – сигнал из пленки, 2 – из зоны малой доли капель, 3 – из капельного ядра потока (границы зон – вертикальные сплошные линии).

**Оценка дисперсности полученной струи.** Для проверки результатов численного моделирования и понимания физических процессов, проходящих в потоке, необходимы данные о дисперсности выходящей из сопла газокапельной (водовоздушной) струи (данные о дисперсности необходимы и для оценки тушающих свойств струи). Вблизи сопла струя имеет столь высокую плотность, что здесь не удалось получить хорошие данные о дисперсности капель



**Рис.20.** Распределение капель по размерам в струе экспериментальной установки на удалении в 1 м от сопла. Горизонтальная оси – логарифмическая шкала диаметров капель в мкм; темная область – объемная доля, (правая шкала); кривая линия – суммарный объем, (левая шкала).  $D_{32}=165.4$ ,  $D_{43}=264$ .

Фотосъемка струи (рис.1) была проведена на удалении в 1 м от среза сопла в свете вспышки продолжительностью  $10^{-6}$  с. Максимальный диаметр капель на снимках около 1 мм. Более точные измерения были выполнены на стенде НИИ НТ МАИ с помощью лазерно-оптической измерительной системы фирмы «Malvern» (рис.20).

**Описание газокапельного соплового течения при значительном (более 10) массовом содержании жидкости.** Проведенные эксперименты подтвердили результаты численного моделирования, полученные в п.4. Для достижения цели работы осталось сформулировать физическую модель (по другой терминологии «феноменологическое описание») газокапельного соплового потока с большой долей капель на основании полученных данных, а также показать, как результаты и инструменты исследования используются на практике.



Картину течения потока в установке можно представить следующим образом: на входе в сопло, в результате смешения воды и воздуха, формируется пульсирующее (имеются в виду прежде всего пульсации массового расхода жидкости) с невысокой частотой (порядка десятков Гц) дисперсное течение с минимумом (в среднем) жидкости на оси и пленкой малой (в среднем) толщины. Пульсации возникают из-за формирования в потоке крупных фрагментов жидкости, которые неустойчивы и разрушаются, загромождая сечение. В сужающейся части сопла значительная часть жидкости выпадает в пленку. Из-за частых ударов капель поверхность пленки покрыта множеством волн, поэтому большинство соударений капель происходит фактически не при малых, а при больших углах, в результате чего отскакивает или выбивается незначительная доля капель. Общая масса сорванных капель в несколько раз меньше потока капель в пленку, поэтому, раз образовавшись, пленка течет до самого среза сопла.

Внутри канала, где концентрация капель сохраняется достаточно высокой, происходит интенсивное столкновение капель, поэтому достаточно быстро теряется информация о первоначальном распределении капель по размерам.

В расширяющейся части канала, как и в соплах с малой концентрацией частиц, у стенки формируется область с малым содержанием капель.

Вытекающая из сопла пленка образует своеобразный экран, поэтому давление в ядре струи может отличаться от атмосферного.

Анализ работы конструктивно похожих систем пожаротушения НИИ НТ МАИ с расходами воды 1, 5 и 10 кг/с показал, что в них реализуется похожее течение.

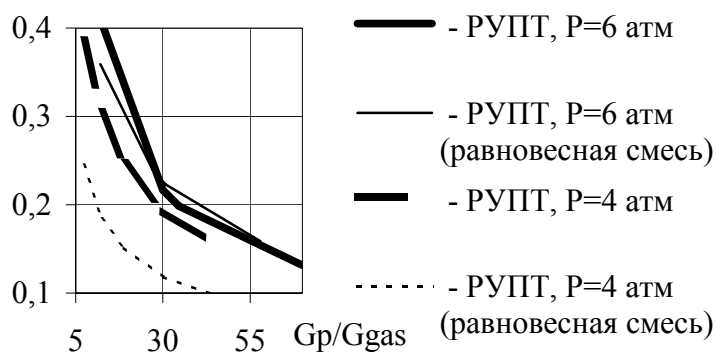
**В 6-ой главе «Использование результатов исследования в научных и прикладных работах»** в качестве примеров применения экспериментальных и теоретических результатов диссертации приведены расчетно-экспериментальная методика поиска оптимального режима работы газожидкостного сопла, а также проведен анализ результатов зондовых измерений, даны предложения по изменению конструкции зонда и методики обработки результатов измерений.

### **Способ поиска оптимального режима работы газочапельного сопла**

Опыт расчетов и экспериментов позволил предложить в работе достаточно простую методику поиска оптимального режима работы газочапельного сопла. Из-за трудности моделирования процессов смешения жидкости и газа конструктивные

решения чаще всего отрабатываются экспериментально. При таком подходе, если установка не дает поток с заданными характеристиками, трудно сказать, в чем кроется причина. То ли “плохое” сопло не разгоняет “хороший” поток капель, то ли наоборот, то ли неверно подобран режим работы, поэтому необходимо для конкретной конструкции найти оптимальный режим работы и сделать это с наименьшими затратами. Возможный способ решения этой задачи излагается ниже.

За идеальный (в смысле передачи энергии от газа к каплям) примем так называемый “равновесный” поток, в котором скорости и температуры капель и газа равны. Такой поток можно рассматривать как “фиктивный” газ. Для заданного сопла расход газа однозначно определяется при заданных параметрах жидкости на входе в сопло и полном давлении газа. Зависимость расхода газа от расхода жидкости можно



определить экспериментально. Такую же функцию можно построить теоретически для “равновесной” смеси (рис.21).

**Рис.21. Расход воздуха [вертикальная ось, г/(с·см<sup>2</sup>)] на единицу площади горла сопла относительно массовой доли воды (Gp/Ggas) для РУПТ.**

Из анализа работы сопел различной конфигурации (см. п.3) и с различным способом смешения газа и жидкости перед соплом /7/ видно, что взаиморасположение экспериментальной и теоретической зависимостей расходов фаз характеризует распределение фаз поперек потока, а именно: при расположении на графике теоретической кривой выше экспериментальной поток достаточно однороден, различие зависимостей вызвано разницей скоростей фаз, при обратном расположении различие вызвано тем, что в потоке много пленки, или существуют зоны, в которых мало жидкости по сравнению со средним.

Выдвинутое предположение позволяет достаточно просто выбрать режим работы и направление совершенствования установки. Оптимальный режим находится в окрестности точки пересечения теоретической и экспериментальной кривых. При расположении теоретической кривой выше экспериментальной основные усилия стоит направить на отработку профиля канала. В противном случае надо совершенствовать камеру смешения.

Изложенная выше методика использовалась при выборе оптимального режима работы сопла системы пожаротушения вертолетного базирования (рис.1) /13/.

**В 7-ой главе «Использование результатов исследования на воздушном транспорте»** показано место перспективных технологий и систем пожаротушения НИИ НТ МАИ и ООО «ТЕМПЕРО» в номенклатуре вооружений аварийно-спасательных служб аэропортов, приведены результаты анализа систем пожаротушения с применением летательных аппаратов (ЛА), показана необходимость создания ЛА с горизонтальной подачей тушащей жидкости, предложена расчетно-экспериментальная методика поиска оптимального режима работы газожидкостного сопла и дан пример использования её при создании системы пожаротушения вертолетного базирования, даны пояснения об особенностях работы ранцевой установки пожаротушения (РУПТ) НИИ НТ МАИ, проведена оценка параметров водяной завесы при возгорании в салоне воздушного судна.

Также известно, что, помимо тушения пожара при АП, часто на аварийно-спасательной службе аэропорта лежит обязанность тушения других видов пожаров. В этом случае применение средств тушения, использующих мелкодисперсную воду, гораздо безопаснее и эффективнее, чем штатных средств пожаротушения.

Еще одна область применения мелкодисперсных систем на воздушном транспорте связана с созданием аэродромных противопожарных автомобилей. Логика развития аэродромных пожарных автомобилей вызвала появление на них систем самозащиты от пожара, обычно это системы создания капельно-водяных завес. Рассматриваемые в диссертации подходы позволяют достоверно прогнозировать параметры таких завес на этапе проектирования.

Для тушения удаленных пожаров при АП и пожаров на высотных объектах совместно с ОАО «Камов» была создана установка пожаротушения большой мощности для пожарного вертолета Ка-32А. Установка осуществляет подачу струи мелкодисперсной жидкости в очаги пожара. Она основана на газодинамической технологии, хорошо зарекомендовавшей себя в ходе эксплуатации РУПТ.

**В Заключении** обобщен опыт использования и перспективы развития многожидкостной модели газочапельного потока с большой долей жидкости, сформулированы результаты работы.

Представленные результаты расчетов, выполненные автором, а также другие численные эксперименты позволяют заключить, что выбранный способ построения ММ вполне подходит для численного исследования и прогнозирования особенностей динамически неравновесных потоков с большой долей капель в каналах. При совпадении средних параметров потока на срезе сопла с результатами расчетов по одномерной модели четко проявились преимущества двумерного моделирования, позволившие выявить и объяснить особенности как соплового потока, так и начального участка струи.

В модели используются экспериментальные зависимости для описания взаимодействия капель с газом, между собой и пленкой для получения тепловых потоков между фазами. Это требует своего рода «настройки» модели в случае, когда меняются вещества или характерные параметры потока.

Вместе с тем, при известных экспериментальных данных, созданная программа расчета может служить инструментом для проверки пригодности тех или иных локальных моделей (описание столкновений капель между собой и пленкой, унос жидкости с пленки, межфазное трение, теплообмен и так далее) для рассматриваемого класса течений. При таком подходе опыт расчетов дает направления совершенствования модели.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Полученные в работе новые экспериментальные данные о пространственной структуре потока позволили уточнить физическую модель течения, полнота этих данных, в комплексе с данными /29,211,240/, позволяет использовать их для проверки других моделей высококонцентрированных газочапельных потоков. В частности, определен характер и получены некоторые количественные данные об изменении по сечению параметров потока на входе в сопло, выявлена зона с малой концентрацией капель у стенки в расширяющейся части сопла, получены данные о колебаниях вытекающей из сопла пленки.
2. Разработана математическая модель пространственного газочапельного соплового течения с учетом пленки, полидисперсности, столкновений и дробления капель при высоком массовом содержании жидкости. Впервые по такой модели проведено численное моделирование осесимметричного соплового газочапельного потока; результаты хорошо согласуются с экспериментом, причем часть расчетных

результатов нашла свое подтверждение в последующих контрольных опытах. Численный эксперимент позволил, с одной стороны, сделать выбор между моделями взаимодействия капель с пленкой, с другой стороны, сделать заключение о структуре поверхности пленки (развитая волновая) и о взаимодействии капель с пленкой (практически нет отскока). Расчеты с различными коэффициентами трения показали, что течение пленки везде можно считать турбулентным, несмотря на невысокое число Рейнольдса, что объясняется искусственной турбулизацией за счет частых ударов капель.

3. Проведенное сопоставление с ранее проведенными расчетами и результатами других исследователей показывает, что в расчетную область необходимо включать область окружающего пространства у среза сопла, учитывать толщину пленки жидкости на стенке сопла и моделировать выхода пленки из сопла. В работе показано, что учет указанных параметров позволяет значительно приблизить граничные условия к реальным.
4. В работе предложен способ прогноза частоты колебаний пленки жидкости, выходящей из сопла. Этот прогноз необходим для оценки устойчивости струй тушащей жидкости. Показано, что заметные колебания с низкой частотой (десятки Гц) угла раскрытия струи и повышенное давление в сужающейся части сопла при повышении расхода воды неизбежно возникают в процессе взаимодействия фаз. Установлено, что частотные характеристики и степень повышения давления связаны со способом смешения газа и жидкости.
5. Выявлены границы применения рассматриваемой математической модели. Установлена их связь с образованием в потоке зон, в которых объемная доля жидкости близка к 1. Даны рекомендации для дальнейшего совершенствования модели, в частности рекомендуется учесть неравновесный теплообмен, также нужны дополнительные данные о взаимодействии капель между собой и пленкой, об уносе капель из пленки;
6. Проведенный анализ численных экспериментов и данных обработки зондовых измерений показал необходимость изменения как методики обработки экспериментальных данных, так и конструкции зонда. Предложена конструкция зонда для одновременного измерения расходов фаз и полного давления потока.

7. Для выбора оптимальных параметров газодисперсных противопожарных систем различной мощности разработана программа расчета параметров потока на ЭВМ, которая использовалась в ходе работ по созданию и совершенствованию систем пожаротушения НИИ НТ МАИ и ООО «Темперо» (РУПТ, система пожаротушения вертолетного базирования, модель системы создания водяной завесы в салоне ВС, газодисперсная система на базе мотоколяски «Кинешма» с расходом 1 л/с).

8. Предложена расчетно-экспериментальная методика анализа внутренней структуры течения и выбора направлений совершенствования сопловых устройств, предназначенных для получения высокоскоростных газочапельных потоков. Методика позволяет значительно сократить материальные и временные затраты при натурных испытаниях опытных образцов двухфазных систем пожаротушения. Показана работоспособность этой методики на примере выбора оптимальных параметров РУПТ и системы пожаротушения вертолетного базирования.

С помощью комплексного подхода к исследованию, при котором расчетные и экспериментальные результаты дополняют друг друга, достигнута цель работы – разработаны физическая и математическая модели газочапельного потока в перспективных системах пожаротушения при большом содержании жидкости.

Автор выражает признательность И.А.Лепешинскому, Г.В.Моллесон, Ю.В.Зуеву, Ю.М.Давыдову, А.А.Шрайберу, А.Л.Стасенко, В.Н.Емельянову, Ю.М.Циркунову, В.Н.Ускову, И.Э.Иванову, И.А.Крюкову за консультации и поддержку автора в ходе работы. Хочу выразить признательность сотрудникам МАИ и НИИ НТ при МАИ, без участия которых не удалось бы провести экспериментальные исследования: Карпышеву А.В., Протасову А., Доркину Э.А., Комарову В.Д., Решетникову В.А., Воронежскому А.В., Яковлеву А.А., Тарасову О.В., Фирсову В.П., Душкину А.Л., Долотказину В.И., Матушкину В., Жданову А.Д. и др.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

### Научные публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Ципенко А.В., Лепешинский И.А., Зуев Ю.В., О.К.Иванов О.К., Решетников В.А., Воронежский А.В., Костюк В.В. Исследование процессов межфазного взаимодействия в многофазных турбулентных струях. // Математическое моделирование (ММ), М., том 11, №4, 1999, с. 59-69.
2. Ципенко А.В., Лепешинский И.А., Воронежский А.В., Зуев Ю.В., Онес В.И., Решетников В.А. Экспериментальные и теоретические исследования газочапельных струй с высокой концентрацией жидкости в газе. // ММ, 2001, том 13, № 6, с. 124-127.
3. Ципенко А.В., Лепешинский И.А., Яковлев А.А., Моллесон Г.В., Воронежский А.В., Онес В.И. Численное и экспериментальное исследование газочапельного

- течения в сопле с большими концентрациями дисперсной фазы. // ММ, 2002, том 14, № 7, с. 121-127.
4. Ципенко А.В. О дисперсности газочапельного потока с большой долей жидкости на выходе из сопла большой длины. // Теплофизика высоких температур, 2006, том 44, № 2.
  5. Ципенко А.В. Численное исследование дальноточности газожидкостных струй дисперсной системы пожаротушения. // Научный вестник МГТУ ГА, сер. Аэромеханика и прочность, № 15, 1999, с. 73-74.
  6. Ципенко А.В. Экспериментальное исследование поведения струи с большим массовым содержанием капель в сносимом потоке. // Научный вестник МГТУ ГА, сер. Аэромеханика, прочность, ..., № 53, 2002, М., с. 94-97
  7. Ципенко А.В. Поиск оптимального режима работы газочапельного сопла. // Научный вестник МГТУ ГА, сер. Аэромеханика, прочность, № 59, 2003, М., с. 66-68.
  8. Ципенко А.В., Тарасов Н.Н., Монашев В.М. Экспериментальное исследование поля мгновенных скоростей за воздушным винтом. // Научный вестник МГТУ ГА, сер. Аэромеханика, прочность, ... № 60, 2003, М., с. 129-133
  9. Ципенко А.В. Отличие равновесной и неравновесной моделей газочапельного потока при большой концентрации капель. // Научный вестник МГТУ ГА, сер. Аэромеханика, прочность, № 72, 2004, М., с. 108-110.
  10. Ципенко А.В. Выбор модели пленки для потока с большой долей капель в осесимметричном сопле. // Научный вестник МГТУ ГА, сер. Аэромеханика, прочность, № 81(1,1), 2005, М., с. 43-47
  11. Ципенко А.В. Исследование особенностей концентрированного газочапельного потока в сопле опытной установки путем численного и натурного экспериментов. // Вестник МАИ, 2005, т. 12, № 4.
  12. Ципенко А.В. Определение причины колебаний угла раскрытия газочапельной струи со значительным содержанием жидкости. // Научный вестник МГТУ ГА, сер. Аэромеханика, прочность, М., 2006, № 97, с. 69-97.

#### **Научные публикации в других изданиях**

13. Ципенко А.В., Карпышев А.В. Оптимизация работы системы пожаротушения вертолетного базирования. / Материалы V межд. научно-технической конференции (нтк) «АВИА-2003», Киев, НАУ, 2003, т.2, с. 24207-24208.
14. Ципенко А.В., Карпышев А.В., Лепешинский И.А., Воронежский А.В., Костюк В.В. Управление параметрами двухфазного потока в канале с большой массовой долей частиц. / Труды IV Минского межд. форума «Тепло-массообмен ММФ-2000», 22-26.05.2000, НАН Беларуси, АНК «Институт тепло- и массо- обмена им. А.В.Лыкова», том 5 «Тепломассо-обмен в двухфазных системах», Минск, с. 509-512
15. Ципенко А.В. Экспериментальное исследование газочапельного потока с высоким относительным массовым расходом воды в сопле. / Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах: Тезисы докладов XVIII Межд. семинара, 21-23.06.2000, СПб, 2000, с. 139.
16. Ципенко А.В. Математическая модель дисперсного неравновесного потока с большой долей жидкости в сопле с учетом пленки, столкновений и аэродинамического дробления капель. / М.: 2004, 46 с., деп. в ВИНТИ 09.11.2004, № 1744-В2004.
17. Ципенко А.В. Об использовании различных моделей при расчете турбулентных двухфазных струй. / "Вопросы исследования летной эксплуатации воздушных судов в особых ситуациях". Межвузовский сб. научн. трудов, М.: МГТУ ГА, 1997, с.82-85.

18. Ципенко А.В., Лепешинский И.А., Иванов В.Э. Модификация модели турбулентности первого порядка для расчета двухфазной турбулентной струи. / "Вопросы повышения уровня летной эксплуатации и безопасности полетов воздушных судов", сборник научных трудов МГТУ ГА, Москва, 1996, с. 109-115
19. Ципенко А.В., Зуев Ю.В., Лепешинский И.А., Воронежский А.В. Моделирование двухфазных струйных течений. Сравнение моделей. / Третий межд. аэрозольный симпозиум (IAS-3), Москва, 2-5 декабря 1996 г. Избранные труды, № 11, с. 28-36
20. Ципенко А.В., Лепешинский И.А., Моллесон Г.В., Яковлев А.А., Янышев С.С. Расчет двухфазного течения в сопле с большой концентрацией дискретной фаз. / Труды II Межд. симпозиума "Актуальные проблемы механики сплошных и сыпучих сред", Москва, Нац. академия прикладных наук, 1999, с.36
21. Ципенко А.В., Костюк В.В., Лепешинский И.А., Моллесон Г.В. Исследование параметров газочапельных струй, распространяющихся в зоне горения. / Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков. Материалы XV научно-практической конференции, ч. 1, 1999, Москва, ВНИИ ПО, с. 266-268.
22. Ципенко А.В., Костюк В.В., Лепешинский И.А., Моллесон Г.В. Расчет сопел с большой массовой долей дискретной фазы методом "крупных частиц". / Тезисы докладов X юбилейной межд. конф. ВМСППС-1999, Переяславль-Залесский, 7-12 июня 1999 г., М., МГИУ, 1999, с. 65-66.
23. Ципенко А.В., Воронежский А.В., Моллесон Г.В. Некоторые результаты численного и экспериментального исследования газочапельного потока с высоким содержанием жидкости. / Тезисы докладов NPNJ-2000, Истра-Москва, 3-7.06.2000, -М., МГИУ, 2000, с. 332-333.
24. Ципенко А.В. и др. Двухфазное течение в сопле при больших концентрациях дисперсной фазы. Численное и экспериментальное исследование./ Тезисы докладов NPNJ-2000, Истра-Москва, 3-7.06.2000, -М., МГИУ, 2000, с. 231-232
25. Ципенко А.В. и др. Методы экспериментальных исследований газочапельных струй с высокой массовой концентрацией жидкости в газе. / Тезисы докладов NPNJ-2000, Истра-Москва, 3-7.06.2000, -М., МГИУ, 2000, с. 229-230.
26. Ципенко А.В. и др. Некоторые результаты экспериментального исследования струй с высокой массовой долей частиц, / "Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах", тезисы докладов XVIII Межд. семинара 21-23.06.2000, СПб., 2000, с. 127
27. Ципенко А.В., Лепешинский И.А., Воронежский А.В., Зуев Ю.В., Онес В.И., Решетников В.А. Экспериментальные исследования газочапельных струй с высокой массовой концентрацией жидкости в газе. / Межд. научная конф. «Двигатели XXI века», 5-7.12.2000, тезисы докладов, -М., ЦИАМ, 2000, с. 10-11.
28. Ципенко А.В., Лепешинский И.А., Воронежский А.В., Моллесон Г.В., Онес В.И., Яковлев А.А. Численное и экспериментальное исследование двухфазного течения в сопле при больших концентрациях дисперсной фазы. / Межд. научная конф. «Двигатели XXI века», 5-7.12.2000, тезисы докладов, -М., ЦИАМ, 2000, с. 11-12
29. Ципенко А.В. Численное исследование компактности двухфазных струй. / Тезисы докладов IV межд. конф. NPNJ-2002/ XIX Межд. семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям, 24-28.06.2002, СПб., -М., МАИ, 2002, с. 425-426.
30. Ципенко А.В., Костюк В.В., Лепешинский И.А., Воронежский А.В., Моллесон Г.В., Яковлев А.А. Численное моделирование методом «крупных частиц» Давыдова двухфазных течений в соплах для газодинамической системы пожаротушения. / Труды III Межд. конгресса "Актуальные проблемы механики сплошных и сыпучих сред" (8-10 февраля 2000 г., Москва, ИМВС РАН), Москва, Нефть и газ, 2000 г., с.44



31. Ципенко А.В., Лепешинский И.А., Воронежский А.В., Зуев Ю.В., Карпышев А.В. Моделирование водовоздушной струи в пространстве с резким изменением температуры. / Природные пожары: распространение, тушение и экологические последствия: Материалы 5-ой межд. конф.-Томск: Издательство Томского университета, 2003, с. 115-116.
32. Ципенко А.В., Карпышев А.В., Душкин А.Л., Доркин Э.А., Яковлев А.А. Ранцевая и вертолетная установки НИИ НТ МАИ, использующие газодисперсную технологию пожаротушения. / Природные пожары: распространение, тушение и экологические последствия: Материалы 5-ой межд. конф.-Томск: Издательство Томского университета, 2003, с. 117
33. Ципенко А.В. и др. Экспериментальное исследование струи с большим массовым содержанием капель в сносящем потоке от винта. / Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества. Тезисы докладов МНТК. – М.: МГТУ ГА, 2003, с.35
34. Ципенко А.В., Карпышев А.В., Яковлев А.А. Создание газожидкостных сопел с заданными параметрами. / Тезисы докладов XX межд. семинара по струйным, отрывным и нестационарным течениям, 1-3.07.2004, СПб., ИПЦ СПбГУТД, с. 158.
35. Ципенко А.В., Карпышев А.В. Применение модели взаимопроникающих континуумов при расчете газочапельных сопловых течений с большой долей жидкости. / Материалы XIV Межд. конф. по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС-2005), Алушта, 25-31 мая 2005 г., - М.: Вузовская книга, 2005. с. 217-218
36. Tsipenko A.V., Karpyshev A.V., Yakovlev A.A. The Ceation of a Gas-Liquid Nozzle with Predictable Behaviour. / Proceedings of the Fourth International Conference on Engineering Computational Technology, Civil-Comp Press, paperback, 346 pp., 2004.
37. Tsipenko A.V., Karpyshev A.V. Considerable Liquid Proportion Gas-Drop Nozzle Flow Simulation by Euler-Euler Model. / Proceedings of the 6-th International Symposium on Transport Phenomena (ISTP-16) 29.08–01.09, 2005 Prague, Czech Republic, p. 191
38. Tsipenko A.V., Karpyshev A.V., Yakovlev A.A. The Ceation of a Gas-Liquid Nozzle with Predictable Behaviour. / Proceedings of ISTP-16 29.08–01.09, 2005 Prague, Czech Republic, p. 190
39. Tsipenko A.V., Karpyshev A.V. Numerical investigation for criteria of compactness for two-phase jets. / «Fluid-particle interaction-VI» conference, August 25-30, 2002, Barga, Italy, UEF, poster session.
40. Tsipenko A.V., Karpyshev A.V. An experimental investigation of heterogeneous jet with a large mass loading ratio in the propeller flow. / «Fluid-particle interaction-VI» conference, August 25-30, 2002, Barga, Italy, UEF, poster session
41. Tsipenko A.V., Kostyuk V.V., Lepeshinsky I.A., Zuev Yu.V., Chabanov V.A., Ivanov O.K, Reshetnikov V.A. Outcomes of experimental research gas-water unisothermal turbulent jet and numerical simulation of experiment. / «Fluid-particle interaction-VI» conference, August 25-30, 2002, Barga, Italy, UEF, poster session