

Введение

Актуальность темы. Основное практическое направление работы – противопожарные системы на воздушном транспорте. Рассмотрим эти системы с двух позиций: тушение пожаров на объектах воздушного транспорта и тушение пожаров с помощью воздушных судов.

Пожары на объектах воздушного транспорта.

В структуру воздушного транспорта входят:

- воздушные суда;
- аэропорты;
- управленческие структуры (департамент, авиакомпании и т.д.);
- органы управления воздушным движением;
- навигационные объекты.

С точки зрения пожароопасности только первый элемент специфичен воздушному транспорту, что отражается в создании специализированных аэродромных пожарных автомобилей. Другая черта, характерная для объектов транспорта и некоторых других отраслей (например, энергетики), связана с тем, что необходимо обеспечить сохранение функций объектов во время пожара и минимизировать вторичный ущерб, то есть максимально сохранить дорогие 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.). Большинство потенциальных пожаров – пожары твердых горючих веществ и/или легковоспламеняющихся и горючих жидкостей (классы А и В).

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 воздушном судне (см. Приложение 28) 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 воздушного судна, когда складывается наиболее опасная для жизни пассажиров и экипажа и тактически сложная обстановка. Причем возникший пожар создает значительные трудности при эвакуации. Эти трудности заключаются в том, что при пожаре в салонах воздушных судов нагрев изолирующей внутренней обшивки вызывает выделение токсичных веществ и происходит воспламенение материалов отделки интерьера салонов. Это приводит к задымлению, повышению давления газообразных продуктов сгорания в фюзеляже, что препятствует открытию дверей и аварийных люков. Время сохранения жизненных условий в самолете в этих случаях оценивается в 2—3 мин. Трудности эвакуации создает и наземный послеаварийный пожар, т.к. его пламя охватывает наружную обшивку дверей и аварийных люков, что также приводит к их заклиниванию. Кроме того, при интенсивном нагреве фюзеляжа, может быть превышен предел огнестойкости его конструкции, и тогда условия пребывания в нем пассажиров значительно ухудшаются /146/¹. Установлено²,

¹ Список использованных источников дан в алфавитном порядке по фамилиям первых авторов, исключение составляют работы автора данной диссертации.

² Здесь и далее используются материалы работы /72/.

что каждый год из 1500 человек, погибших в АП, 270 погибают в результате удушения дымом или токсичными газами, под воздействием тепла, а также в процессе эвакуации³.

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 ряд требований к средствам тушения:

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

Всем этим требованиям удовлетворяют системы, использующие диспергированную воду⁴.

Основное преимущество водяного тумана (рис. 1) с каплями менее 200 мкм состоит в большой скорости поглощения тепла из горючих газов и пламени. Суммарная поверхность капельного объема, отнесенная к массе всех капель, увеличивается обратно пропорционально радиусу капель, поэтому, кроме увеличения скорости испарения, увеличивается суммарная площадь испарения мелких капель и общий уровень потерь тепла при пожаре.

Второй эффект - оттеснения кислорода из зоны пламени. При быстром испарении водяной пар замещает воздух в зоне горения, что пропорционально уменьшает скорость горения материала и интенсивность тепловыделения.

³ После спасения людей стоит задача спасения бортовых устройств регистрации (БУР), в которых заключена информация, существенно влияющая на результаты расследования АП. А основным фактором, уничтожающим информацию БУР, также является пожар /119,120/.

⁴ Ниже использованы материалы с сайта ООО «Темперо» (www.tempero.ru) и /131,154/.

Третьим механизмом подавления огня является поглощение теплового излучения. Эксперименты показали, что тепловой поток в области длин волн 1-6 мкм от стандартных очагов возгорания снижается более чем в 4 раза на расстоянии 1,7 м от них при наличии в помещении водяного тумана.

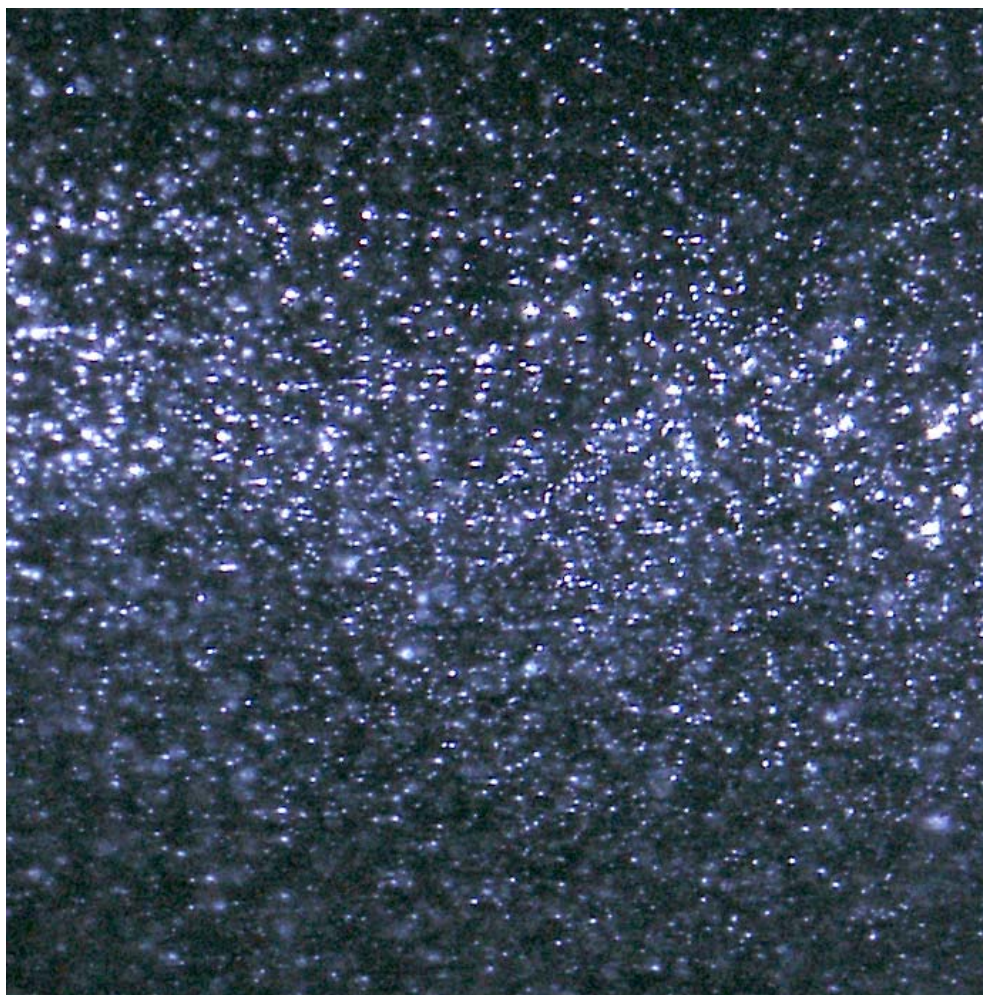


Рис.3. Снимок струи ранцевой установки пожаротушения (РУПТ) НИИ НТ МАИ недалеко от среза разгонного сопла; каждая «звездочка» - отразившая свет вспышки капля. Расстояние от верхней границы снимка до нижней около 30 мм.

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 стволами и существующими 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;
- снижение эксплуатационных расходов по сравнению с порошковыми, аэрозольными, газовыми системами.

Также исследования показывают /104/, 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.

Несмотря на понимание преимуществ мелкодисперсных систем, очевидное уже в 50-х годах XX века, до недавнего времени превалировало мнение о преимуществах применения воды с размером капель более 400 мкм в стандартных стволах и автоматических системах пожаротушения. Действительно, "грубые" струи воды способны достичь очага пожара, проникнуть в его ядро и потушить возгорание, однако при этом большое количество воды (до 60%) стекает ниже уровня пожара и на горение не воздействует. Смачивание и охлаждение твердых горючих материалов достигается легче при использовании капель размером более 400 мкм, но для этого требуется большее количество воды.

Использование установок пожаротушения с тонкораспыленной водой в качестве огнетушащего вещества началось в областях, ранее не имевших установок противопожарной защиты. Так, фирмы «Airbus» и «Boeing» установили в салонах и технических отсеках самолетов спринклерную

автоматическую систему пожаротушения тонкораспыленной водой с ограничением времени до 7 минут. Для защиты пассажирских кают и машинного отделения морского парома "Звезда Скандинавии" фирмой "Marioff" создана и установлена централизованная спринклерная система пожаротушения с использованием "водяного тумана", по зарубежной терминологии - "Hi-fog". Для защиты комплекса зданий армейской базы Великобритании, в том числе вычислительного центра и складов дорогостоящего оборудования, используются автоматические спринклерные оросители 727 FC; помимо централизованных установок, используются модульные установки автоматического пожаротушения для помещений, где находятся люди и ценное оборудование. Фирма "Marioff" чаще всего для этого использует тонкораспыленную воду, полученную при смешении воды с газом (воздухом) и последующим выпуском этой смеси через разгонные сопла. С середины восьмидесятых годов на британском подводном флоте противопожарная защита осуществляется с помощью установок с тонкораспыленной водой дисперсностью до 400 мкм. Кроме закрытых помещений, установки пожаротушения с использованием тонкораспыленной воды применяются на открытых площадках. Так, австрийская фирма "Aquasys" с успехом испытала спринклерную систему для тушения трансформаторов 12000 KVA, установленных на открытом воздухе.

Перечисленные примеры являются только малой частью применения установок пожаротушения с тонкораспыленной водой, причем область их использования непрерывно расширяется. Самой главной угрозой для жизни людей и утраты материальных ценностей является быстрое и неконтролируемое распространение огня и дыма. В момент так называемого пробоя слой дыма оказывает поджигающее воздействие, и шансы для распространения пожара в другие отсеки очень высоки. Вода тонкого распыления охлаждает дымовые газы и сильно ослабляет мощность теплового излучения. В связи с этим представляется весьма интересным направлением

стратегия поддержания контроля над пожаром. Это предотвратит распространение и не позволит вовлечь в пожар еще не воспламененные сгораемые предметы и, тем самым, окончательно защитит объект от большого пожара. Отметим, что такая стратегия является прерогативой только при использовании воды тонкого распыления и не может быть применена для других огнетушащих веществ. 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 отсутствием систем, способных доставить мелкодисперсный поток к месту возгорания.

Эффективность установок, генерирующих мелкодисперсную воду, зависит от четырех основных факторов: размера капель, объемной концентрации в очаге пожара, от кинетической энергии капель, от геометрических и тепловых характеристик очага пожара. По научно-технической литературе и патентной информации стран Западной Европы, Северной Америки, России и Японии был проведен достаточно полный анализ технологий генерирования мелкодисперсных струй жидкости с учетом перечисленных факторов /102/.

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).

Сопла для распыления жидкости под действием высокого давления создают высокоскоростные струи огнетушащей жидкости в каналах сравнительно небольшого диаметра. В таких соплах обычно применяют завихрители, установленные перед отверстиями и служащие для дополнительного разбиения струи жидкости. Рабочее давление в системах обычно составляет от 0,5 до 28 МПа. Сопла данного типа могут быть

приведены в действие по отдельности или объединены в дренчерную систему пожаротушения. В соплах может применяться нагретая жидкость для дополнительного образования пара в потоке. Средний размер 90% образующихся капель составляет 150 мкм и менее. Использование для получения струи пожаротушающих жидкостей насоса либо вытеснение каким-либо газом ограничивает возможности современных средств пожаротушения из-за весогабаритных и энергетических параметров системы. В частности, для получения скорости жидкой струи, равной 100 м/с, требуется давление порядка 50 атм. Насос, коммуникации и другие агрегаты для получения таких давлений усложняются и приобретают неприемлемые вес и габариты.

Сопла с дефлекторами действуют за счет соударения струи жидкости, обладающей средней скоростью, с дефлектором, который разбивает струю жидкости на мелкие капли. Входное отверстие сопла через трубопровод подключается к источнику огнетушащей жидкости. Напротив выходного отверстия сопла устанавливается дефлектор. Размеры капель, генерируемых с помощью сопел данного типа, варьируются в более широком диапазоне по сравнению с соплами других типов. Более 90% капель в распыляемом потоке имеют размер менее 600 мкм. Рабочее давление в соплах с дефлекторами обычно составляет от 0,7 до 1,72 МПа. Сопла могут включаться в работу по отдельности, небольшими группами или все одновременно. Сопла с дефлекторами могут использоваться в спринклерных и дренчерных системах.

Сопла для распыления потока жидкости за счет взаимодействия струй жидкости. С помощью сопел данного типа образуются несколько пар тонких струй, соударяющихся одна с другой под острыми углами, вследствие чего происходит разбиение струй на мелкие капли. Рабочее давление в соплах данного типа составляет обычно от 0,3 до 0,7 МПа. Полученные капли обладают низкой энергией. Использование подобного типа сопел эффективно в ручных стволах для тушения нелетучих легковоспламеняющихся жидких

веществ за счет охлаждения и разбавления легковоспламеняющегося вещества огнетушащей жидкостью.

Сопла для распыления жидкости посредством газодинамического механизма ускорения. В этих соплах, которые также называются двухфазными соплами, происходит разбиение струи жидкости потоком сжатого газа и смешение капель жидкости с потоком газа в камере смешения. В соплах данного типа используют жидкость под давлением около 0,5 МПа.

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. В начальном сечении получаемой струи присутствует и газ и жидкость, причем концентрация и распределение жидкой фазы определяется требованиями, предъявляемыми к струе в каждом конкретном случае. 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 газочапельной смеси.

Именно такой способ реализован в новых системах пожаротушения /106/, разработанных НИИ НТ при МАИ и выпускаемых ООО «ТЕМПЕРО»⁵, в исследовании и совершенствовании которых принимал участие автор. Представление о таких потоках и установках дают фотографии, приведенные на рис.2,3. Проведённый патентный поиск показал, что в настоящее время пожарные системы на основе газодинамической технологии не имеют аналогов ни в России, ни за рубежом.

⁵ Подробнее см. сайт tempero.ru

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 (см. также Приложение 27). По сравнению с известными импортными и российскими системами они, помимо преимуществ от использования тонкораспыленной воды, имеют следующие положительные особенности:

- использование небольших давлений жидкости (не более 10-15 атм.) для достижения необходимой дальности и дисперсности, что позволило уменьшить массу и габариты средств пожаротушения, а, следовательно, и эксплуатационные расходы;
- значительно большую дальность подачи дисперсной огнетушащей жидкости, в том числе чистой воды или воды с добавками, что расширяет тактические возможности и безопасность;
- высокую скорость струи, позволяющую, помимо охлаждения поверхности горения, сбивать пламя;
- большую протяженность прямого участка струи (в отличие от гидрантов и других водяных систем), что позволяет увеличить эффективность воздействия на очаги, расположенные в помещениях, через проемы;
- возможность работать как в импульсном, так и непрерывном режимах;
- слабая отдача;
- мобильность, автономность и универсальность позволяют существенно уменьшить время до начала тушения.

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



Рис.2. Газодисперсная система пожаротушения НИИ НТ МАИ на мотоколяске «Кинешма».



Рис.3. Газодисперсная ранцевая система пожаротушения НИИ НТ МАИ.

Характерные особенности потоков в соплах таких установок:

- многофазность (дисперсность): через канал текут газ и жидкость, причем жидкость может быть большей частью в капельном виде;
- массовая доля жидкости более 10, объемная доля капель может составлять десятки процентов;
- капли достаточно мелкие, 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 необходимо было решить следующие важные проблемы:

- 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.

Следует отметить, что в начале исследования практически ничего не было известно о структуре и распределении параметров потока во входном сечении сопла, о пленке жидкости внутри и на выходе из сопла.

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

Тушение пожаров с помощью летательных аппаратов (ЛА).

Воздушные суда являются очень дорогим средством тушения, поэтому они используются в случаях, когда:

- территориально удаленный от пожарных расчетов и/или тушащих веществ пожар грозит уничтожить большие материальные ценности (например, пожар в заповедниках и т.п.);
- нет других средств обеспечения безопасности людей (например, лесной пожар вблизи населенных пунктов);

- в прилегающих к пожару районах нельзя находиться людям (например, пожар на складах боеприпасов);
- средства тушения наземных пожарных расчетов не обеспечивают эффективного тушения или затруднено их развертывание (крупные городские пожары).

В мировой практике в этих случаях тушение пожаров осуществляют с помощью самолетов и вертолетов, оборудованных специальными сливными устройствами или имеющими приспособления для сбрасывания контейнеров, заполненных огнетушащими веществами (ОВ). В одних случаях это первая атака самолетов и вертолетов на возникшие пожары с целью их сдерживания до подхода основных сил наземного пожаротушения, в других случаях – тушение с воздуха для оказания помощи наземным командам.

Применение данных установок началось, по существу, с создания надежных и эффективных ЛА, то есть с начала прошлого столетия. Сперва ЛА применялись лишь как транспортные средства, однако сравнительно быстро в США, Канаде, Франции и Российской Федерации стало разрабатываться специальное противопожарное оборудование.

В настоящее время установились три подхода к созданию установок пожаротушения с применением летательных аппаратов:

- Первый подход заключается в разработке специальных пожарных ЛА, предназначенных непосредственно для тушения лесных пожаров. Примерами могут служить пожарные самолеты CL-215 Canader, AT-802. Такие ЛА обладают наибольшей эффективностью, но и наибольшей стоимостью.

- Второй подход состоит в использовании морально устаревших аппаратов военной, транспортной или сельскохозяйственной авиации, на которые после их доработки устанавливаются стационарные установки. Данный подход является наиболее дешевым.

- Третий подход заключается в использовании существующих ЛА, для которых ведется разработка различных устройств распределения ОВ, обычно

съемных или подвесных. При этом пожарный вариант ЛА может быть легко преобразован в транспортный или пассажирский. Примерами служат пожарные самолеты C-130 Hercules с системой MAFFS и Ил-76П.

В ООО «Артпром Н» был проведен анализ основных тенденций развития технологий пожаротушения с использованием ЛА /101/. Выявление основных направлений развития проводилось на основе патентной документации за период с 1991 до 2002 года ведущих промышленно развитых стран мира и других стран, в которых в последние годы шло интенсивное развитие технологии пожаротушения. Приняты во внимание при проведении исследования источники информации включают в себя патентную документацию Российской Федерации, США, Канады, Японии, Великобритании, ФРГ и Франции, европейские заявки, а также международные заявки, поданные в соответствии с Договором о патентной кооперации. Поиск по патентной информации проводился в официальных электронных базах данных патентных ведомств отобранных стран и в электронной базе данных Всемирной Организации Интеллектуальной Собственности.

Из анализа патентной документации можно сделать вывод о том, что в настоящее время установок для тушения высотных пожаров очень мало, причем подавляющее большинство – проекты, не доведенные до практического использования.

К характерным особенностям пожара на высотном объекте можно отнести 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.4) 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.



Рис. 4. Газодисперсная система пожаротушения НИИ НТ МАИ на вертолете Ка-32А.

Состояние проблемы. При выборе цели и основных задач исследования ограничимся анализом состояния дел в изучении максимально похожих потоков, то есть подробно *не рассматриваем* исследования газочапельных течений в трубах, потоков с твердыми частицами, низкоконтрированных потоков, когда объемной долей частиц или капель можно пренебречь,

псевдооживленных и сыпучих слоёв /35/⁶, пузырьковых /12,26,37/ и пенных течений /134,220/, суспензий и т.п. Также не касаемся потоков с химическими реакциями /141,247/ и фазовыми переходами, в частности, вскипающих потоков в соплах (см., например, /51/), когда на вход подается жидкость, может быть, с пузырьками газа, а на выходе из сопла получается газокпельный поток⁷. Подробно не рассматриваем и работы по газовым, жидкостным /24/, газожидкостным струям и струям с частицами, исследования которых ведутся достаточно широко. Это связано, с одной стороны, с тем, что существенно отличаются граничные условия, с другой стороны, достижения в этой области нашли свое применение в работах по течениям в каналах. Полезная информация, полученная исследователями в указанных выше направлениях, используется по необходимости, о чем даются соответствующие ссылки и комментарии в тексте. Не претендуя на полноту изложения, обратим внимание читателя на такие работы, как /19,35,46,52,77,97,98,152,202,207/, где также имеется достаточно подробная библиография по исследованиям, ведущимся в упомянутых выше направлениях.

Так как, прежде всего, необходимо прогнозировать особенности течения, то на первый план выходят задачи построения соответствующей физической модели⁸, учитывающей наиболее важные явления и процессы в потоке, и запись математической модели, позволяющей получить (рассчитать) параметры потока с достаточной точностью, поэтому рассмотрим прежде теоретические исследования многофазных течений в соплах.

Хорошо известны одномерные модели таких потоков /7,13,16,127/. Они развиваются для достаточно сложных течений с учетом фазовых переходов,

⁶ Приводимые ссылки – всего лишь примеры работ в соответствующих направлениях, а не подробная библиография.

⁷ Несмотря на похожие участки течения, при моделировании таких потоков необходимо решать задачу о распаде объема жидкости на капли, что требует чрезвычайно больших ресурсов и выходит за рамки данной работы.

⁸ Под физической моделью здесь понимается набор основных факторов, особенностей, условий, характеризующих поток (силы, типы энергетического обмена, типы массообмена и т.д.), то есть то, что иногда называют феноменологическим описанием (см. /73/).

химических реакций /141/ и т.д. 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, например /21,42,67,71,88,129,130,139,140,246/ 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 упрощающих предположений при построении моделей или при проведении конкретных расчетов.

Потоки с пленкой теоретически исследовались применительно к задачам теплообмена или моделирования работы аппаратов химического производства. Об этих моделях можно составить представление, например, по /23,50,64,153/ и по приведенной в них библиографии. Большой комплекс работ связан с исследованиями безопасности ядерных реакторов и других сооружений /77,210/. Понимая, что список далеко не полный, отметим лишь несколько публикаций, близких к работе автора диссертации: /3,8,74/.

Но особенности сопловых течений (относительно большие градиенты параметров, динамическая неравновесность) в этих задачах не учитываются или учитываются с серьезными упрощениями. Только в некоторых работах /58,76,77/ решалась задача моделирования движения частиц в плотной упаковке.

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 капель⁹.

⁹ В обзоре Зайчика Л.И., Першукова В.А. /52/ сказано: «Численное моделирование высококонцентрированных дисперсных сред представляет собой исключительно сложную задачу, так как такие течения, вследствие их гидродинамической неустойчивости, как правило нестационарны даже при стационарных граничных условиях».

Что касается экспериментальных исследований таких потоков, то большой комплекс работ был проведен в Харьковском (см. сборники ХАИ «Вопросы газотермодинамики энергоустановок») и Московском авиационных институтах /16,17,29,156,211,213/. Среди похожих есть работы по струйным аппаратам /204/. Аналогичные исследования проводились и в других организациях, смотри, например, /6,7,59,60,96/. Состояние дел в изучении менее концентрированных (массовая доля жидкости не превосходит 5) потоков можно понять, например, по /214/. Однако в подавляющем большинстве исследований, определяются только средние (интегральные) параметры потока, то есть о распределении газа и капель поперек входа и выхода сопла можно только догадываться. В работах /30,182/ определялись некоторые параметры течения на срезе сопла, однако методика измерений в столь плотных потоках только развивается, поэтому часть результатов требует проверки. Информация о характере течения в соплах также носит только качественный характер, например, практически ничего не известно о пленке¹⁰. Вместе с тем эксперименты ясно показывают, что существует проблема определения коэффициента сопротивления для фрагментов дискретной фазы (капель) /48,57/, что важен способ смешения газа и жидкости /65,224/, что есть проблемы в описании взаимодействия газа и пленки (см. обзорные работы /50,229/). На практике это проявляется в многообразии конструкций для смешивания газа и жидкости и разгона полученной смеси (см., например, /108-114,223/, при этом ответ на вопрос, насколько оптимальна данная конструкция¹¹, обычно отсутствует.

Таким образом, на сегодня нет однозначного ответа на вопрос о пригодности той или иной модели для расчета параметров динамически неравновесных газочапельных потоков при значительном содержании

¹⁰ При разработке двухфазных систем пожаротушения НИИ НТ МАИ сначала полагалось, что пленка вообще отсутствует.

¹¹ По любому критерию оптимальности.

жидкости в соплах, соответственно нет и достаточных для понимания всех особенностей течения экспериментальных данных.

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

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели необходимо:

- определить характерные параметры исследуемых потоков;
- сформулировать математическую модель газочапельного 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 натурных экспериментов показать способность модели отражать пространственные особенности потоков высокой концентрации;
- показать возможности предлагаемых теоретических подходов при решении практических задач.

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.

Анализ, проведенный в работах /130,140/, позволяет выделить несколько способов моделирования многофазных течений.

Не будем касаться потоков разреженного газа и сразу ограничимся случаем, когда непрерывную фазу (газ) можно считать сплошной средой, что

касается дискретной фазы (жидкости), то здесь чаще всего используются следующие подходы:

- изучается поведение отдельных капель (фрагментов);
- смесь газа с каплями рассматривается как некий «фиктивный газ»;
- множество капель заменяется сплошной средой со специальными свойствами.

С результатами, получаемыми с использованием первого подхода, можно ознакомиться в /116/. Но достаточно очевидно, что в нашем случае первый подход не приемлем при моделировании, так как в расчете практически невозможно отследить все траектории с учетом столкновений и дробления капель, а ведь ещё надо накопить достаточно информации для статистической обработки результатов.

Второй подход применяется для оценки общих (интегральных) характеристик потока. Примеры его использования можно найти в /139/. Однако в случае сильно неравновесного взаимодействия газа и жидкости или при значительных искривлениях линий тока (траекторий) при таком подходе весьма проблематично учесть все особенности течения (например, свободные от капель зоны), то есть велика погрешность в определении локальных характеристик течения и могут теряться интересные физические эффекты. Также существует проблема определения вязкости, теплоемкости и других характеристик смеси при этом подходе. К этому подходу примыкает интересный метод функционала плотности /47/, однако он требует очень мелкой расчетной сетки для разрешения всех границ фаз и множества вариантов расчетов для накопления статистической информации, то есть необозримо много машинного времени в нашем случае.

Третий подход выглядит предпочтительнее, и в этом направлении достигнуты значительные успехи.

Множество капель можно представить по-разному. Способ, каким это делается, прежде всего зависит от агрегатного состояния дискретной фазы

(жидкая, твердая)¹². Возможно описание с использованием модели Х.А.Рахматулина /93,125/, когда частицы считаются неким «газом», взаимодействующим со сплошной фазой и не создающим давления. Можно воспользоваться и способом, применяемым в молекулярно-кинетической теории газов, когда поведение ансамбля частиц характеризуется аналогами температуры и давления в газе, могут вводиться также вязкость для «газа» частиц и т.п. Для капель этот способ использовался, например, в работах /15,155/. В книге Л.Е.Стернина и А.А.Шрайбера /140/ приведена с пояснениями достаточно полная и прозрачная классификация возможных способов описания ансамбля капель, основанная на задаче Д.Джиллеспи¹³.

Задача Д.Джиллеспи. Для простейшей разреженной системы, содержащей в начальный момент две группы капель (крупные и мелкие), можно определить среднее количество ударов dv для некоторой крупной капли за время dt . Возможны три варианта толкования величины dv , которым соответствуют три подхода:

а) *кинетический*¹⁴ (квазистохастический, дискретный) - dv есть доля крупных капель, которые за время dt претерпевают по одному столкновению с малыми каплями;

¹² Возможно также, что в каплях содержатся твердые включения, что твердые частицы имеют жидкую оболочку и так далее, см., например, /140/. В работе такие ситуации не рассматриваются.

¹³ *Задача Д.Джиллеспи.* Рассматривается простейшая разреженная система объемом V , содержащая в начальный момент две группы капель:

- количеством N с массой M , радиусом R , скоростью \mathbf{W} ,
- количеством n с массой m , радиусом r , скоростью \mathbf{w} , причем $m \ll M$, $N \ll n$.

Капли одной группы между собой не взаимодействуют. Каждое столкновение между каплями M и m приводит к полному слиянию, в результате чего масса крупных капель m_0 возрастает, но общее число их не увеличивается. Мелких капель m настолько много, что можно считать их число постоянным. Очевидно, за время dt произвольная капля M с вероятностью $\mathcal{E}(m, M)$ столкнется с теми каплями m , центры которых находятся в цилиндре с площадью основания $S = \pi \cdot (R+r)^2$ и образующей $L = dt \cdot (\mathbf{W} + \mathbf{w})$. Если ввести константу взаимодействия $K(m, M) = S \cdot (\mathbf{W} + \mathbf{w}) \cdot \mathcal{E}(m, M) / V$, то величина

$$dv = K \cdot n \cdot dt$$

есть среднее количество ударов для некоторой крупной капли за время dt .

¹⁴ Этот подход применяется, например, в /27/ и восходит к работам М.Смолуховского.

б) *стохастический*¹⁵ - dv есть вероятность объединения какой-либо малой капли с крупной за время dt ;

в) *непрерывный* (приближение непрерывного роста) – dv есть количество мелких капель, которые каждая крупная капля присоединяет за время dt .

В настоящем исследовании был выбран последний подход, как наименее энергоемкий при численном моделировании. У этого подхода можно отметить следующий недостаток: погрешность в определении функции распределения капель по размерам возрастает с уменьшением разницы в размере сталкивающихся капель. Как будет показано в ходе работы, этот недостаток не играет большой роли на фоне допущений при численном решении и скудных экспериментальных данных о дисперсном составе капель.

Для решения системы уравнений математической модели был взят метод «крупных частиц» /11,87/. Это вызвано способностью метода рассчитывать все поле течения без выделения особенностей и удобством программирования при последовательном усложнении модели.

С экспериментальными исследованиями концентрированных газожидкостных потоков в соплах дело обстоит так же, как с моделированием, то есть, несмотря на довольно большой объем специальной литературы, в основном имеются данные об интегральных характеристиках потоков: средняя скорость, средний диаметр капель, давление вдоль стенки канала и т.п. Это связано с тем, что, с одной стороны, до последнего времени таких данных хватало для решения практических задач, с другой стороны, высокая плотность потока капель требует специальных методов измерения.

Обычно для исследования детальной структуры потока (скорости газа и капель, дисперсный состав, термодинамические характеристики) используются оптические и зондовые методы, первоначально разработанные для однородных сред. Применение этих методов для дисперсных потоков потребовало создания специальных методик /19,84/. Сейчас такие методы достаточно хорошо развиты

¹⁵ Этот подход связан с громоздкими вычислениями, пример его использования можно найти в /140/ и в приведенной там библиографии.

для потоков с малой объемной концентрацией частиц или капель. В нашем случае оптическая плотность настолько высока, что среди дистанционных методов остаются только весьма специфические, например, применение ионизирующего излучения /107,222/. Зондовые методы натываются на такие проблемы, как сильная деформация течения вниз по потоку от носика зонда, невозможность обеспечить изокINETический отбор проб в некоторых зонах потока /30/.

Что касается пленки, то её успешно исследуют с помощью зондов-пробоотборников, зондов – измерителей полного давления¹⁶, электрозондов, ультразвука, электрохимическими методами и так далее (см., например, /89,122,217,244,245/). Эти способы натываются на определенные проблемы, если граница пленки нечеткая, что весьма вероятно в нашем случае. В работе автор ограничился использованием электрозонда.

В связи с вышесказанным имеет смысл использование косвенных методов экспериментального исследования, когда вывод о детальной структуре потока делается на основании применения некоторых гипотез к результатам измерений. В частности, можно сравнивать результаты измерений с результатами детального численного моделирования при различных комбинациях параметров.

Также использовались результаты зондовых измерений плотности орошения и полного давления у среза сопла, проведенных А.В.Воронецким /29,30/ и А.А.Яковлевым /211/, фотоснимки, данные с электрозонда и интегральные характеристики потока, полученные автором.

Достоверность результатов исследования. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается поверкой и тарировкой аппаратуры, а также использованием визуальных методов исследования. Достоверность расчетных результатов обусловлена строгим применением

¹⁶ В отличие от однофазного (газ или жидкость) потока, где измеряется именно полное давление, в двухфазном потоке понимание показаний зонда как полного давления не столь очевидно /84/.

теории математического моделирования и подтверждается тестовыми расчетами, согласованностью с экспериментальными результатами и качественным прогнозом картины течения, подтвержденным специальными экспериментами.

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

- сформулирована математическая модель пространственного газокапельного соплового течения с учетом пленки, полидисперсности, столкновений и дробления капель при высоком (около 30) массовом содержании жидкости;
- впервые по такой модели проведено численное моделирование осесимметричного соплового газокапельного потока; результаты хорошо согласуются с экспериментом, причем часть расчетных результатов нашла свое подтверждение в последующих контрольных опытах;
- 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 газочапельных 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 газочапельного потока.

Созданная для ЭВМ программа расчета параметров газочапельного потока использовалась в ходе работ по созданию и совершенствованию газодинамических противопожарных систем различной мощности. В частности, для РУПТ НИИ НТ МАИ расчеты показали, что:

- конструкция камеры смешения вызывает пульсации расхода;
- в случае ухода от номинального режима в горле сопла возможно возникновение пенного режима течения;
- при импульсном режиме тушения пожара сокращается время работы ранцевой установки;
- давление на оси струи ниже давления окружающего воздуха, а на границе – выше, что объясняет устойчивость струи;
- при изменении конструкции камеры смешения в широких пределах практически не меняется средний диаметр капель и дальность струи.

Предложена расчетно-экспериментальная методика анализа внутренней структуры потока и выбора направлений совершенствования опытной установки /187/, генерирующей газочапельный поток. Эта методика использовалась для выбора давления и расходов фаз в системе пожаротушения вертолетного базирования.

Экспериментальные методики использовались для исследования взаимодействия газочапельной струи с потоком от воздушного винта /186,188/ при создании системы пожаротушения вертолетного базирования.

Расчетные методики и программа расчета двухфазной турбулентной струи использовались для прогнозирования дальнотойности систем пожаротушения НИИ НТ МАИ и ООО «Темперо».

Блок программы для расчета трехмерного газового потока использовался при моделировании работы двигателя АЛ-31ФП на высотном-климатическом стенде У-10М ЦИАМ им. П.И.Баранова.

Предлагаемая модель использовалась для оценки возможностей и параметров установки, создающей водяную завесу в салоне воздушного судна или туннеле.

Предлагаемая модель подойдет для моделирования потоков в парогенераторах, газожидкостных эжекторах /108/, химико-технологических установках, устройствах резки металлов /1/, бетона /90/ и т.п., а также в других устройствах, где гидродинамические процессы являются определяющими.

В трехмерном варианте возможно рассчитывать параметры противопожарных струй, причем не только мелкодисперсных, от установки (ствола, монитора) до очага пожара (зоны повышенной температуры).

Представление результатов работы. Основные результаты исследований докладывались на XVII /163,164/, XVIII /173,181/, XIX /183,184/ и XX /198/ семинарах "Течения газа и плазмы в соплах, струях и следах" («Военмех» и С.-Петербургский государственный университет, С.-Петербург, 1997, 2000, 2002, 2004 г.), на III /174-177/, IV и V /199/ международных конференции по неравновесным процессам в соплах и струях (NPNJ) в Москве (2000 г.), С.-Петербурге (2002 г.) и Самаре (2004 г.), на II и III Международных симпозиумах "Актуальные проблемы механики сплошных и сыпучих сред" (Москва, Национальная академия прикладных наук, 1999 и 2000 г.) /167,172/, на IV Минском международном форуме «Тепло-массообмен ММФ-2000» (Минск,

2000) /180/, на Международной научной конференции «Двигатели XXI века» (Москва, ЦИАМ им. П.И.Баранова, 2000) /178,179/, на конференции «Fluid-particle interaction-VI» (Италия, 2002) /237-239/, на V международной научно-технической конференции (нтк) «ABIA-2003» (Киев, НАУ, 2003) /194/, на 5-ой международной конференции «Природные пожары: распространение, тушение и экологические последствия» (Томск-Красноярск, 2003) /195,196/, на 4-ой международной конференции по инженерным компьютерным технологиям «ЕСТ-IV» (Португалия, 2004) /240/, на 16-ом международном симпозиуме по явлениям переноса «ISTP-16» (Чешская республика, 2005) /241,242/, на 10-ой (Переславль-Залесский, 1998) /169/ и 14-ой международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам «ВМСППС» (Украина, 2005) /200/, на научно-методической конференции, посвященной 50-летию кафедры "Теории воздушно-реактивных двигателей" Московского государственного авиационного института (Москва, 1995) /160/, на 3-ем и 4-ом международных аэрозольных симпозиумах (IAS, Москва, 1996, С.-Петербург, 1998) /161,166/, на Международной нтк "Современные научно-технические проблемы гражданской авиации" (МГТУГА, Москва, 1996) /162/, на XV научно-практической конференции «Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков» (Москва, 1999) /168/, на международной нтк «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества» (Москва, 2003) /197/.

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

На защиту выносятся:

- физическая модель потока, полученная на основании численных и натурных экспериментов;
- математическая модель пространственного газочапельного соплового течения с учетом пленки, полидисперсности, столкновений и дробления капель при высоком (около 30) 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 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 газочапельных потоков.

Структура работы. Работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка использованных источников, включающего 247 наименований, списка условных обозначений и 28 приложений. Работа содержит 130 рисунков, 12 таблиц. Номера рисунков, таблиц и формул состоят из номера главы и текущего номера внутри главы, например, (1.13) – формула 13 из главы 1. Список использованных источников дан в алфавитном порядке по фамилиям первых авторов, исключение составляют лишь работы автора данной диссертации. Объем работы составляет 342 страницы.

В Главе 1 определяются характерные параметры потока, который будет основным объектом исследования. По результатам численного моделирования и экспериментальным данным получены критерии компактности газочапельной струи. В итоге получены массовые расходы, профиль канала, давление, средние скорости фаз так называемого «базового» потока. Показано, что, при постоянном давлении газожидкостной смеси на входе в сопло, существует такое отношение расходов газа и жидкости, при котором дальность полета капель максимальна. Сопоставление с картами режимов течения показало, что следует ожидать клочковато-кольцевого и/или кольцевого режима течения, что

надо учитывать пленку на стенке канала и столкновения капель в потоке. Созданы сопла для экспериментального исследования потока на специальном стенде.

В Главе 2 приводится полная система уравнений математической модели газокапельного потока в канале. Законы сохранения массы, импульса и энергии записаны как для сплошных сред – это так называемая многожидкостная модель или модель взаимопроникающих континуумов. Автором проведены оценки различных параметров потока, на основании чего выбраны явления, которые учитываются в модели.

Некоторые введенные подмодели (столкновения капель с пленкой, коэффициентов трения пленки) определяются неоднозначно и требуют специального исследования для выбора наиболее соответствующей рассматриваемому классу течений. Результаты, полученные автором в этом направлении, приводятся в последующих главах. Подробно описаны модель пленки (в одномерной постановке), модель столкновения капель друг с другом. Автором учтено соотношение времени аэродинамического дробления и времени свободного пробега (пролета) капли.

Для получения численных решений выбран метод «крупных частиц», реализованный автором в виде программы для ПЭВМ.

В Главе 3 на основании тестовых расчетов выбраны параметры расчетной сетки, проведен анализ вариантов математической модели и моделирование некоторых экспериментов. Расчеты показали, что можно численно за приемлемое время получать параметры потока при столь большой концентрации капель. Масштаб применимости модели сплошной среды для базового варианта на порядок меньше поперечного диаметра сопла, то есть допустимо применять предложенные модель и метод. Сопоставление с экспериментальными данными показывает, что даже в простом варианте, без учета полидисперсности, столкновений и пленки, есть хорошее совпадение по средним скоростям и по давлению вдоль сопла, качественное совпадение

изменения параметров по радиусу. В частности, модель «видит» такие явления, как «запирание сопла» и значительное перераспределение жидкости поперек канала. Это дает основание использовать предлагаемую модель для анализа процессов внутри сопла.

Приведенные в этой главе расчетные результаты качественно ближе к экспериментальным данным, чем те, что получены по модели без учета пленки. Проявилась дополнительная «степень свободы» модели – поправка к коэффициенту аэродинамического сопротивления, учитывающая близость соседних частиц. Данные расчетов позволили провести оценку характерных времен основных процессов, происходящих с отдельной каплей, для выяснения влияния этих процессов на основные характеристики потока.

В итоге выделены задачи, решение которых будет составлять суть дальнейших исследований.

В Главе 4 проведено численное исследование газокапельного соплового течения и начального участка выходящей из сопла струи. Численные эксперименты показали, что для проверки качества моделирования недостаточно средних характеристик потока, таких как расходы фаз, импульс потока на срезе сопла (тяга сопла), изменение 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 на входе в сопло.

Также расчеты показали, что для прогнозирования и объяснения поведения, компактности газокапельной струи необходимо рассматривать не одно сопло, а систему «камера смешения + сопло + начальный участок струи». Это вполне согласуется с экспериментальными результатами.

Численное моделирование выявило ряд особенностей высоконцентрированного газокапельного потока, которые допускают, с одной стороны, прямую или опосредованную экспериментальную проверку, с другой

стороны, помогают выбирать направления совершенствования сопла и камеры смешения.

В Главе 5 приводятся данные проведенных автором и другими исследователями натуральных экспериментов по исследованию газочапельных потоков, 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 газочапельном сопловом течении при значительном (более 10) массовом содержании жидкости, с другой стороны, показывают возможности многожидкостной математической модели в этой области. Дело в том, что полноценный физический эксперимент трудоемок и требует создания специальных средств измерения и обработки, поэтому в данной работе численные и физические эксперименты дополняют друг друга.

Эксперименты, проведенные автором, дополняют результаты других исследователей. Комплекс экспериментальных данных о потоке на выходе из сопла дает полную количественную информацию о течении. Выявлены колебательные процессы, которые не фиксировались обычной фотосъемкой, видеосъемкой и зондом. Результаты экспериментов дают материал для проверки моделей двухфазных струй с высокой объемной долей дискретной фазы. Дан способ прогнозирования частоты колебаний пленки жидкости, выходящей из сопла.

Опыт расчетов позволяет заключить, что выбранный способ построения математической модели вполне подходит для численного исследования и прогнозирования особенностей динамически неравновесных потоков с большой долей капель в каналах. Четко проявились преимущества двумерного расчета, позволившие выявить и объяснить особенности как соплового потока, так и начального участка струи, чего не дают одномерные модели.

В Главе 6 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 /28,206/, даны предложения по изменению конструкции зонда и методики обработки результатов измерений.

В Главе 7 даны пояснения об особенностях работы ранцевой установки пожаротушения (РУПТ) НИИ НТ МАИ, 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, проведена оценка параметров водяной завесы при возгорании в салоне воздушного судна, показано место перспективных технологий и систем пожаротушения НИИ НТ МАИ и ООО «ТЕМПЕРО» в номенклатуре вооружений аварийно-спасательных служб аэропортов.

В Заключении обобщен опыт использования и рассмотрены перспективы развития многожидкостной модели газокапельного потока с большой долей жидкости, приводятся основные результаты работы. В итоге достигнута цель работы – для газокапельного соплового течения при значительном (более 10) массовом содержании жидкости получено описание внутренней структуры, выделены основные особенности взаимодействия фаз (сформулирована физическая модель), показаны возможности многожидкостной математической модели в этой области.

В Приложениях даны некоторые материалы с сайта «Темперо-групп» <http://www.tempero.ru>, подробное исследование критериев компактности двухфазной струи, данные экспериментов и численных расчетов, описание дробления капель аэродинамическими силами по книге /140/, документы, подтверждающие практическое использование результатов работы.

Диссертационная работа выполнена в рамках 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.

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 за консультации и моральную 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., Воронецкому А.В., Яковлеву А.А., Тарасову О.В., Фирсову В.П., Душкину А.Л., Долотказину В.И., Матушкину В., Жданову А.Д. и др.