

На правах рукописи

**Ярыгин Игорь Вячеславович**

**ГАЗОКАПЕЛЬНЫЕ ПОТОКИ ИЗ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ  
КАНАЛОВ В ВАКУУМ**

01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2005

Работа выполнена в Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель: академик РАН  
Ребров Алексей Кузьмич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Лукьянов Герман Александрович

доктор физико-математических наук  
Павленко Александр Николаевич

Ведущая организация: Институт теоретической и прикладной  
механики СО РАН

Защита состоится «15» июня 2005 г. в 11 часов на заседании  
диссертационного совета Д 003.053.01 по защите диссертаций на  
соискание ученой степени доктора наук при Институте теплофизики им.  
С.С. Кутателадзе СО РАН (630090, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института тепло-  
физики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

Автореферат разослан «5» мая 2005 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
д.ф.-м.н.



В.В. Кузнецов

2006-4  
15528

2149229

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

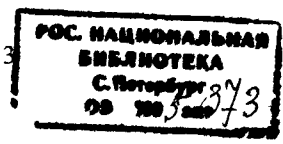
**Актуальность темы.** Диссертационная работа посвящена экспериментальному исследованию газокапельных потоков, формирующихся при сверхзвуковом истечении газа из сопла в вакуум с пристенной пленкой жидкости. Хотя вопрос об истечении газа в вакуум или затопленное пространство был предметом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований, задача о совместном истечении газа с пристенной пленкой жидкости до настоящего времени практически не исследовалась. Интерес к истечению жидкостей и газожидкостных смесей в вакуум обусловлен широким спектром научных и практических приложений. К числу последних относится проблема внешнего загрязнения поверхностей космических аппаратов, в том числе Международной Космической Станции струями двигателей ориентации, в которых топливная пленка используется для охлаждения стенок сопла.

Важная особенность задачи состоит в наличии спутного сверхзвукового градиентного газового потока, что может приводить к сильному динамическому воздействию газа на пристенную пленку жидкости при её движении внутри сверхзвукового сопла и в струе за ним. При истечении в вакуум вследствие резкого падения давления жидкость становится мгновенно перегретой, что должно приводить к её взрывообразному распаду на капли. Возникающая при этом структура течения представляет несомненный научный и практический интерес, что обуславливает актуальность экспериментального исследования истекающих в вакуум газокапельных потоков, включая развитие новых методов диагностики локальных характеристик капельной фазы и её пространственного распределения, а также установление и исследование физических процессов и механизмов, определяющих формирование и свойства таких течений.

**Цель работы** состояла в исследовании физических процессов и явлений, сопровождающих истечение газа из сопла с пристенной пленкой жидкости в вакуум, включая взаимодействие пленки со спутным потоком внутри сопла, диспергирование пленки на выходной кромке сопла, формирование сверхзвукового газокапельного потока.

### **Научная новизна.**

Установлено, что при сверхзвуковом истечении газа из сопла с пристенной пленкой жидкости в вакуум возникают две области течения капельной фазы – центральная и периферийная, существенно отличающиеся по условиям формирования, размерам и скоростям капель.



Показано, что режим движения пристенной пленки жидкости со спутным потоком газа внутри сопла является стрессовым и сопровождается уносом капель с поверхности пленки в поток.

Обоснован газодинамический механизм эффекта подъема пленки жидкости по наружной поверхности сопла против сил тяжести при её истечении в вакуум со спутным потоком газа.

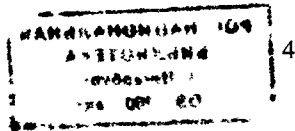
Установлено возникновение обратных потоков капельной фазы, обусловленных разрушением пристенной пленки жидкости на выходной кромке и внешней поверхности сопла на капли и их взаимодействием с потоком несущего газа.

**Практическая ценность работы.** Полученные в работе экспериментальные результаты могут быть использованы при создании и апробации моделей и методов расчета сверхзвуковых газокапельных течений. Результаты работы нашли практическую реализацию в виде специальных газодинамических защитных устройств, разработанных специалистами РКК Энергия им. С.П. Королева и установленных на двигатели ориентации Служебного Модуля МКС. Разработанные в диссертации методы получения и диагностики газокапельных потоков представляют самостоятельный интерес и могут быть практически полезны для других исследований и приложений.

**Достоверность** результатов проведенных исследований подтверждена оценкой погрешностей измерений, статистической воспроизводимостью результатов и сравнением полученных результатов с имеющимися в литературе.

#### **На защиту выносятся:**

- Результаты исследования локальных характеристик пристенной пленки жидкости при её движении со спутным сверхзвуковым градиентным газовым потоком в сопле.
- Экспериментальные данные по исследованию эффекта возникновения возвратного движения пристенной пленки жидкости по наружной поверхности сопла при её истечении со спутным газовым потоком в вакуум.
- Результаты исследований сверхзвукового газокапельного потока, включая общую структуру течения капельной фазы, её пространственное распределение и функции распределения капель по размерам, скоростям и направлениям.
- Экспериментальные данные по управлению (снижению) обратными потоками капельной фазы с помощью специальных экранов.



**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на семинарах Отдела разреженных газов ИТ СО РАН под руководством академика А.К. Реброва; 1<sup>st</sup> Russian Korean International Symposium on Applied Mechanics RUSKO-AM-2001 (Novosibirsk, 2-4 October 2001); VII (Новосибирск, 23-26 апреля 2002 г.) и VIII (Новосибирск, 6-8 октября 2004 г.) Всероссийских конференциях молодых ученых «Актуальные проблемы теплофизики и физической гидрогазодинамики»; XIX (Санкт-Петербург, 24-28 июня 2002 г.) и XX (Санкт-Петербург, 1-3 июля 2004 г.) Международных семинарах по струйным, отрывным и нестационарным течениям; XI (Novosibirsk, 1-7 July 2002) и XII (Novosibirsk, 28 June - 4 July 2004) International Conferences on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR'2002, ICMAR'2004); IV Всероссийской конференции молодых ученых «Проблемы механики: теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск, 1-2 июля 2004 г.); XXVII Сибирском теплофизическом семинаре СТС-27 (Новосибирск, 1-5 октября 2004 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 работ.

**Структура и объем диссертации.** Работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Объем диссертации - 157 страниц, включая 3 таблицы и 79 рисунков. Список литературы составляет 92 наименования.

**Личный вклад автора.** Автору принадлежит основной вклад в разработку методики расчета толщины и скорости пристенной пленки жидкости при её движении со спутным газовым потоком в сверхзвуковых соплах; создание экспериментальных методик визуализации структуры течения капельной фазы; получение данных по функциям распределения капель по размерам, направлениям и скоростям. Вклад автора в совместные исследования состоял в создании системы управления и сбора данных; экспериментального оборудования для получения газочапельных потоков в вакууме; разработке новых методик измерения пространственных распределений капельной фазы; обработке и обобщении результатов экспериментов. Результаты исследований обсуждались и анализировались с соавторами работ, за что автор выражает им искреннюю признательность.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели исследований, отмечена научная новизна и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, и кратко описана структура диссертации.

Первая глава посвящена обзору литературы. Опубликованные к настоящему времени монографии (Дулов, Лукьянов, 1984; Авдучевский и др., 1985, 1989) и обзоры (Ребров, 1974, 2002; Лукьянов, 1983) дают достаточно полное представление о явлениях и процессах, сопровождающих истечение газа в вакуум и затопленное пространство. В то же время, задача о совместном истечении газа с пристенной пленкой жидкости в вакуум до настоящего времени практически не исследовалась.

Взаимодействие пристенных пленок со спутным потоком пара или газа было предметом многочисленных исследований применительно к различным теплообменным аппаратам и устройствам (Алексеевко, Накоряков, Покусаев, 1992). Такое взаимодействие в зависимости от конкретных условий может сопровождаться процессами испарения-конденсации и уноса капель с поверхности пленки (Дейч, Тетера, 1980; Гогонин, 2004). В то же время, недостаточно исследовано поведение пленок жидкости в сверхзвуковых градиентных потоках при пониженных давлениях (ниже давления насыщенных паров жидкости).

При совместном истечении газа с пристенной пленкой жидкости в вакуум происходит её взрывообразный распад (Fuchs, Legge, 1979; Muntz и др., 1984) с образованием сверхзвукового газокапельного потока, структура которого зависит от многих факторов, и практически не изучалась.

В заключение обзора сформулирована постановка задачи.

Вторая глава содержит описание экспериментальной установки, рабочих участков и методов диагностики газокапельных потоков.

Дано описание вакуумной газодинамической установки ВИКИНГ Института теплофизики СО РАН, существенно модернизированной для проведения исследований по газокапельной тематике. Отмечается, что наличие достаточно большого объема вакуумной камеры (150 м<sup>3</sup>) существенно расширяет возможности установки для работы в импульсных режимах. Это позволило проводить эксперименты с расходами газа в 100-1000 раз больше, чем при работе установки в стационарном режиме. Длительность импульса составляла около 5 сек.

Рассмотрены способы организации пристенной пленки жидкости со спутным газовым потоком, дано описание рабочего участка для создания газокапельного потока в вакууме с компьютерным управлением и регистрацией режимных параметров.

Рассмотрены вопросы моделирования в вакуумных камерах струй натуральных двигателей ориентации космических аппаратов и космических станций. Выбраны «базовые» параметры модельных сопел, газа и

жидкостей. В экспериментах диапазоны изменения режимных параметров существенно перекрывали «базовые». В экспериментах использовались сменные сверхзвуковые конические и профилированные сопла с числом Маха  $M_a = 3$ , а также цилиндрические сопла-трубки с различными формами выходной кромки (острая, круглая, прямоугольная). В качестве рабочего газа использовался воздух, в качестве рабочих жидкостей – этанол и бутанол, отличающиеся по давлению насыщенных паров примерно на порядок. Во всех экспериментах начальные температуры газа и жидкостей были близки к комнатной.

Большое внимание в диссертации уделено вопросам диагностики локальных характеристик пристенной пленки жидкости при её движении внутри сопла и капельной фазы в сверхзвуковом газокapельном потоке.

Исследования локальных характеристик пристенной пленки проводились с использованием зондов емкостного типа с диаметром внешнего электрода 1,6 мм, внутреннего – 0,5 мм. Зонды заделывались заподлицо с внутренней поверхностью сопла. Использовались две схемы измерений. В первой схеме два зонда располагались последовательно друг за другом на расстояниях 7 мм и 2 мм от выходной кромки сопла. Эта схема использовалась, в основном, для измерения скоростей переднего фронта пленки и крупных волн на её поверхности. Во второй схеме (рис. 1) четыре зонда располагались через  $90^\circ$  по периметру сопла на расстоянии 2 мм от выходной кромки.

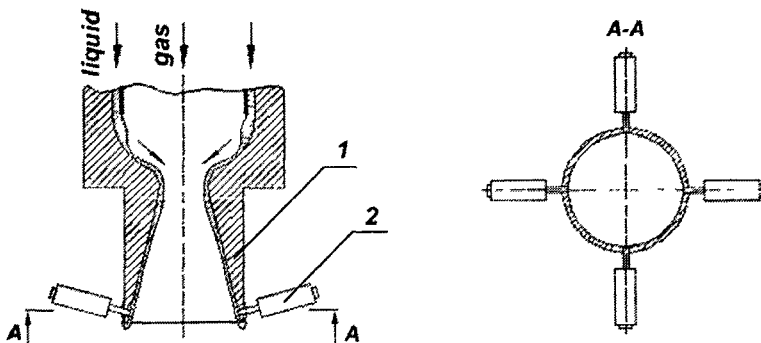
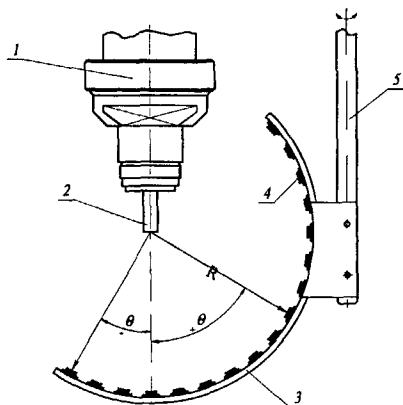


Рис. 1. Схема измерений толщины пленки жидкости.  
1 – сверхзвуковое сопло, 2 – емкостный зонд

Эта схема использовалась для измерений толщины пленки. Усреднение измерений по четырем зондам позволило повысить надежность и точность измерений толщины пленки.

Измерение угловых распределений капельной фазы в сверхзвуковом газокапельном потоке является важной и в то же время достаточно трудной задачей. Основная трудность состоит в быстром испарении капель, попавших на датчик или подложку. Другая трудность состоит в том, что измерения надо проводить не в отдельной точке, а одновременно во всем поле течения, включая обратные потоки. В данной работе трудность измерений, связанная с испарением капель в вакууме, была обойдена путем добавления в модельную жидкость специально подобранного красителя, не сублимирующегося в вакууме. При таком подходе количество жидкой фазы определяется по количеству красителя (сухого остатка), оставшегося на датчике после испарения жидкости. В качестве красителя использовался родамин бжКДМ. Весовая концентрация красителя составляла 0,065% и, по-видимому, не могла сколь либо существенно повлиять на физические свойства рабочих жидкостей.

Для получения угловых распределений капельной фазы реализована схема измерений, показанная на рис. 2. Она включает источник газокапельного потока 1 со сменным соплом 2, измерительное кольцо 3 с расположенными на нем датчиками 4 и поворотный механизм 5. Поворотный механизм обеспечивал требуемое время нахождения измерительного кольца в газокапельном потоке. Центр измерительного кольца совпадал с центром выходного сечения сопла. Радиус кольца  $R$  равнялся 70 мм и был выбран, исходя из минимизации влияния сил



гравитации на результаты измерений и обеспечения необходимой точности измерений. Измерения проводились в диапазонах углов  $\theta$  от  $-30^\circ$  до  $+150^\circ$  относительно оси струи. На измерительное кольцо устанавливались датчики разного типа.

Рис. 2. Схема измерений угловых распределений капельной фазы



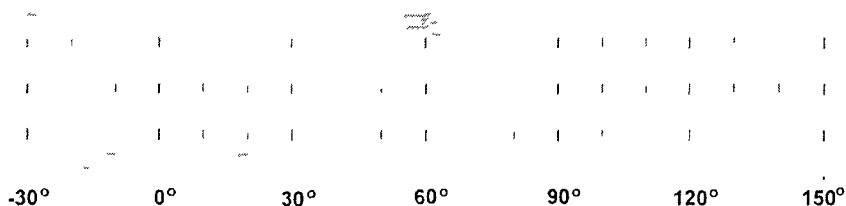
В работе были созданы три независимых методики измерения угловых распределений капельной фазы.

*Методика кварцевых микровесов.* Принцип измерения основан на изменении частоты поверхностных колебаний кварцевой пластины от массы прилетевших на датчик капель. Эта методика имеет ограничения сверху по величине потока капельной фазы на датчик и поэтому использовалась лишь в отдельных экспериментах при проведении измерений в периферийной области газокапельного потока.

*Методика спектрофотометрирования.* Основная идея этой методики состоит в использовании методов спектрального фотометрирования для определения количества красителя (сухого остатка), оставшегося на датчике после испарения прилетевших на него капель. Для получения углового распределения капельной фазы в газокапельном потоке необходимо на диагностическое кольцо установить выбранное количество датчиков-улавливателей капельной фазы. После окончания эксперимента необходимо приготовить соответствующее количество кювет со спиртовым раствором сухого остатка и с помощью спектрофотометра по предварительно проведенной тарировке получить угловое распределение капельной фазы. Концентрация красителя в полученном растворе определялась по величине поглощения света раствором на длине волны  $\lambda = 5260 \text{ \AA}$ . В этих измерениях использовался однолучевой спектрофотометр СФ-26. Измерения усреднялись по 20-30 запускам.

*Методика осаждения на полосу из бумаги.* В этой методике на измерительное кольцо помещалась узкая, шириной 6 мм, полоска фотобумаги для струйных принтеров, на которую осаждались капли из газокапельного потока. После проведения эксперимента бумажная полоска извлекалась из вакуумной камеры и сканировалась на сканере. Далее полученное полноцветное изображение конвертировалось в 8-битное изображение «оттенки серого», после чего с помощью разработанной программы по оцифрованному изображению определялась угловая зависимость интенсивности окраски с одновременным усреднением по ширине полоски. Хотя эта методика дает лишь качественные результаты, она очень наглядна и позволяет оценить размеры капель и их угловое распределение. Общий вид бумажных полосок приведен на рис. 3, из которого видно, что в газокапельном потоке, формирующемся при совместном истечении пристенной пленки с газом из сопла в вакуум, возникают две характерные области течения капельной фазы – центральная ( $\Theta \approx \pm 30^\circ$  от оси струи) и периферийная

( $\Theta \approx 30-150^\circ$ ). По характеру окраски можно на качественном уровне заключить, что в центральной области капли мелкодисперсные, а в периферийной – достаточно крупные. Было установлено, что возникновение центральной области течения капельной фазы обусловлено срывом капель в поверхности пленки в области критического сечения сопла, их дальнейшим ускорением и дроблением при движении внутри сопла и в струе за ним. Возникновение периферийной области течения капельной фазы обусловлено диспергированием пристенной пленки жидкости на выходной кромке сопла. Количественные измерения угловых распределений капельной фазы по методике спектрофотометрирования подтвердили существование центральной и периферийной областей.



*Рис. 3. Общий вид бумажных полосок*

В диссертации на основании анализа ожидаемых размеров и скоростей капель были выбраны и созданы две схемы визуализации структуры течения капельной фазы - с освещением лампами накаливания и лазером по методу «лазерного ножа». Первая схема позволяла получать общие картины течения капельной фазы, вторая (с использованием стробоскопической подсветки) – функции распределения капель по размерам, направлениям и скоростям. Для регистрации использовались цифровая видеокамера Canon XM1 и цифровой фотоаппарат Nikon 5700.

Созданные методики позволили получить достоверную информацию о локальных характеристиках пристенной пленки жидкости при её движении в сверхзвуковом сопле и структуре сверхзвукового газокapельного потока при истечении в вакуум.

В третьей главе исследуется взаимодействие спутного газового потока с пристенной пленкой жидкости внутри сопла. Эксперименты проведены в диапазонах чисел  $Re_{газа} = 3 \cdot 10^4 \div 4 \cdot 10^5$ ,  $Re_{лж} = 7 \div 14$  (для этанола) и  $Re_{лж} = 2,5 \div 5,3$  (для бутанола).

В начале главы дан анализ особенностей взаимодействия пристенной пленки жидкости со спутным газовым потоком в условиях рассматриваемой задачи. Эти особенности включают сильное падение статического давления в спутном газовом потоке (примерно в 30 раз для  $M_a = 3$ ); сильное динамическое воздействие спутного потока на пленку, приводящее к волнообразованию и интенсивному срыву капель (числа Вебера по параметрам пленки и газового потока в критическом сечении сопла достигают 200); влияние геометрического фактора (сверхзвуковая часть сопла – расширяющийся канал). Наиболее ярко эти особенности проявились в экспериментах с этанолом, обладающим по сравнению с бутанолом существенно более высоким давлением насыщенных паров и меньшей вязкостью. На рис. 4 для  $Re_{nl} = 14$  приведены временные диаграммы толщины пленки этанола для двух значений давления газа в форкамере сопла  $p_0 = 820$  и 100 мм рт. ст. Расчетные значения статического давления  $p_a$  в потоке над пленкой в точке измерения составили 24 и 3 мм рт. ст., соответственно, т.е. ниже давления насыщенных паров этанола (44 мм рт. ст. при комнатной температуре). Видно, что понижение давления в потоке вызывает сильный рост флуктуаций поверхности пленки и её средней толщины.

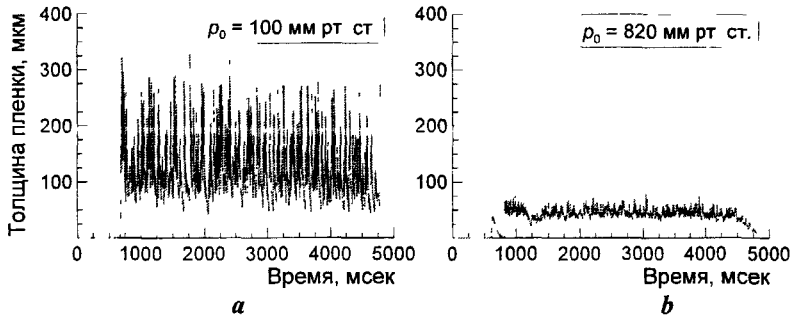


Рис. 4. Временные диаграммы толщин пленки этанола

Полученные в экспериментах данные по толщине и скорости пленки сравнивались с расчетами по модели, в которой расход жидкости  $m$  и касательное напряжение на границе раздела  $\tau$  считаются заданными:

$$\delta_{nl} = \sqrt{\frac{m\mu}{\pi R \rho \tau}}, \quad V_{nl} = \sqrt{\frac{m\tau}{4\pi R \rho \mu}}, \quad (1)$$

где  $\mu$ ,  $\rho$  – вязкость и плотность жидкости,  $R$  – радиус канала.

В расчетах величина  $\tau$  на внешней поверхности пленки принималась равной величине  $\tau$  на стенке сопла в отсутствии пленки. Результаты сравнения по толщине пленки для бутанола и этанола приведены на рис. 5.

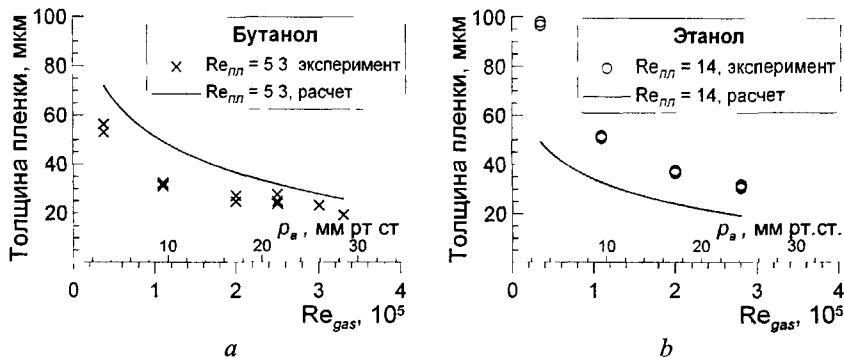
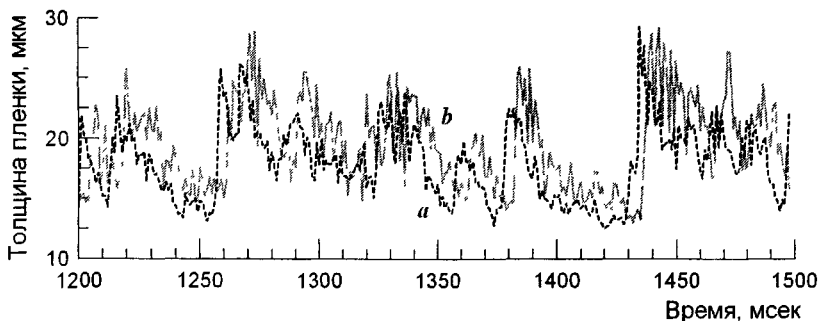


Рис. 5. Экспериментальные и расчетные данные по толщине пленки. а – бутанол, б – этанол

Видно, что для бутанола расчетные данные идут выше экспериментальных, а для этанола – наоборот. Анализ показывает, что так, по-видимому, и должно быть. Основное воздействие спутного газового потока на пленку бутанола в рассматриваемых условиях – волнообразование и срыв капель. Учет этих процессов приведет к увеличению величины  $\tau$  на границе раздела по сравнению с принятой в расчетах величиной  $\tau$  для гладкой стенки. Если учесть это увеличение  $\tau$ , то расчетная кривая приблизится к экспериментальным точкам. Для пленки этанола в добавление к процессам волнообразования и срыва капель имеет место испарение и кипение пленки. Если исходить из высказанной в ряде работ гипотезе об аналогии процессов испарения жидкости в спутный поток и вдува вещества в пограничный слой через проницаемую стенку, а также аналогии трения и теплообмена, то можно предположить, что величина  $\tau$  на поверхности раздела при наличии процесса испарения жидкости с этой поверхности должна быть меньше по сравнению с величиной  $\tau$  для гладкой стенки. Если допустить, что в условиях проведенных экспериментов процесс испарения жидкости доминирует над другими, то расчетная кривая для пленки этанола (рис. 5 б) должна приблизиться к экспериментальным точкам. Хотя проведенные рассуждения носят качественный характер, они позволяют лучше понять сложные физические процессы и явления, которые сопровождают

взаимодействие пленки со спутным потоком в рассматриваемых условиях (волнообразование, срыв капель, фазовые переходы).

Использование двух последовательно расположенных зондов позволило оценить корреляцию показаний и измерить скорости переднего фронта пленки и крупных волн на её поверхности. На рис. 6 показана часть временной диаграммы толщины пленки в промежутке от 1200 мсек до 1500 мсек по показаниям зондов. Наблюдается корреляция показаний по амплитуде и форме сигналов и наличие некоторой периодической волновой структуры с характерным временным масштабом  $\approx 50$  мсек (частотой  $\approx 20$  Гц). Видно также, что волны имеют крутой фронт, а затем идет пологая часть, на поверхности которой движутся более мелкие волны. Обработка показала, что характерные значения скоростей переднего фронта пленки и крупных волн составляют примерно 0,5 м/сек и 1 м/сек, соответственно.



*Рис. 6. Толщина пленки жидкости, измеренная двумя последовательно расположенными зондами.*

*a – первый (верхний по потоку) зонд, b – второй (нижний по потоку) зонд*

Для выяснения режима течения пленки в условиях данной работы был поставлен специальный эксперимент, в котором в одном случае сопло располагалось вертикально вниз (обычная в экспериментах данной работы ориентация сопла), в другом – вертикально вверх. При этом все остальные условия проведения эксперимента сохранялись одинаковыми. Результаты измерений толщины пленки бутанола для экспериментов «сопло вниз» и «сопло вверх» показали, что в пределах 20% они совпадают. Этот достаточно важный результат свидетельствует о стрессовом режиме движения пленки и незначительном влиянии сил гравитации в экспериментах данной работы.

В заключительной части главы на основе выполненных Ю.И. Герасимовым и А.Н. Крыловым (РКК Энергия им. С.П. Королева) расчетов траекторий движения капель в сверхзвуковом сопле рассмотрены «капельный» и «пленочный» механизмы переноса жидкости на выходную кромку сопла. Для профилированных сопел могут иметь место капельный и пленочный механизмы переноса жидкости, для конического сопла возможен только пленочный механизм. Экспериментально эти особенности были подтверждены измерениями угловых распределений капельной фазы в газокапельных потоках за сверхзвуковыми коническим и профилированным соплами.

В четвертой главе исследуется истечение пристенной пленки со спутным газовым потоком в вакуум. Основное внимание уделено диспергированию пленки на выходной кромке сопла и структуре течения образующегося газокапельного потока.

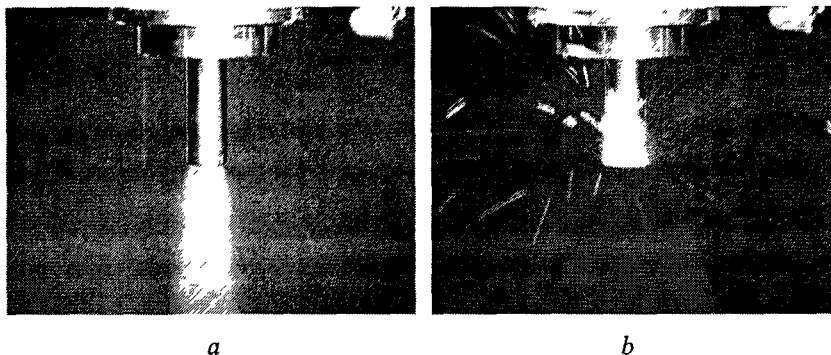
В начале главы выделены особенности истечения пристенной пленки со спутным потоком из сопла в рассматриваемых условиях.

Главная особенность состоит в том, что при попадании жидкости в вакуум она становится мгновенно перегретой и взрывообразным образом распадается на капли (фазовый взрыв). Как следует из диаграмм состояния этанола и бутанола, давление насыщенных паров этих жидкостей, попавших в вакуум, на несколько порядков (примерно четыре порядка для этанола и три – для бутанола в условиях данных экспериментов) превышает давление в окружающем пространстве. При этом, как показали эксперименты данной работы, спутный поток оказывает определяющее влияние на формирование возникающего газокапельного потока.

Другая особенность состоит в быстром по мере удаления от среза сопла падении плотности в несущем газовом потоке. Это приводит к изменению режима течения в струе от сплошного вблизи сопла до разреженного в дальнем поле, а также к ослаблению динамического воздействия спутного газового потока на капли. Сопутствующим процессом является быстрое испарение капель в вакууме. Делается вывод, что основные события, определяющие структуру газокапельного потока, происходят вблизи выходной кромки сопла.

Эксперименты показали, что при истечении в вакуум с газовым потоком пристенная пленка жидкости, стекающая по внутренней поверхности сопла, не только распадается на капли на выходной кромке сопла, но и выходит на наружную поверхность сопла, двигаясь по ней в обратном направлении, даже против сил тяжести. Обнаруженный эффект

определяющим образом зависит, при прочих равных условиях, от величины давления в окружающем пространстве. На рис. 7 для сопла в виде цилиндрической трубки представлены фотографии, показывающие как изменяется структура течения при понижении давления в вакуумной камере. Рис. 7а относится к истечению в пространство с атмосферным давлением, рис. 7б – в пространство с низким давлением ( $p_{\text{ж}} < 0,1$  мм рт. ст.). Видно, что при истечении в вакуум на внешней поверхности сопла появляется пленка жидкости; толщина пленки порядка 1 мм. Такая же картина наблюдается и в случае сверхзвукового сопла.



*Рис. 7. Фотографии истечения пристенной пленки жидкости со сputным газовым потоком в атмосферу (а) и в вакуум (б)*

Рис. 8 показывает результаты измерений высоты подъема пленки при различных давлениях в вакуумной камере для трубки (рис. 8 а) и сверхзвукового сопла (рис. 8 б).

Экспериментальные данные на рис. 8 сравнивались с расчетами по модели С.Ф. Чекмарёва, в которой применительно к условиям экспериментов высота подъема пленки  $h_m$  оценивалась из баланса сил на пленке

$$\rho_l g h_m = p_{g1} - p_{g2} + p_L, \quad (2)$$

где  $\rho_l$  - плотность жидкости,  $g$  - ускорение силы тяжести,  $p_{g1}$  и  $p_{g2}$  - давления в газе на нижнем и верхнем краях пленки, и  $p_L = \sigma/r$  - лапласовское давление на нижнем крае пленки.

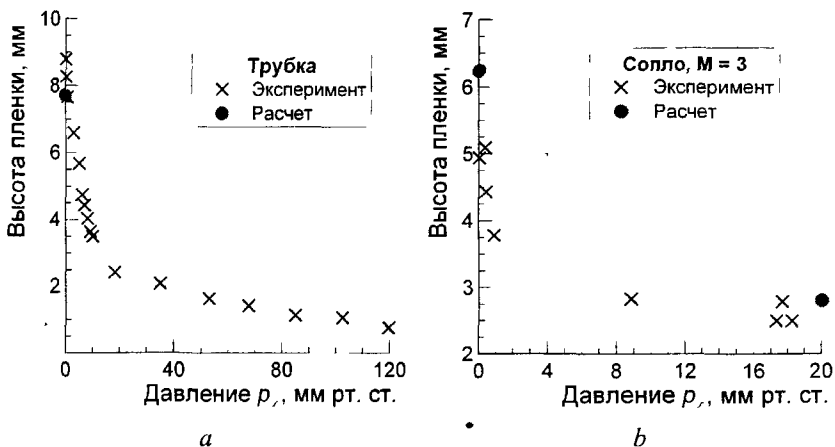


Рис. 8. Высота подъема пленки.  
*a* – цилиндрическая трубка, *b* – сверхзвуковое сопло

С использованием развитых методов диагностики исследовано влияние определяющих параметров (геометрии сопла, свойств жидкости, параметров спутного потока) на структуру течения капельной фазы в газокапельном потоке.

Типичные результаты измерений углового распределения капельной фазы в газокапельном потоке за сверхзвуковым соплом представлены на рис. 9.

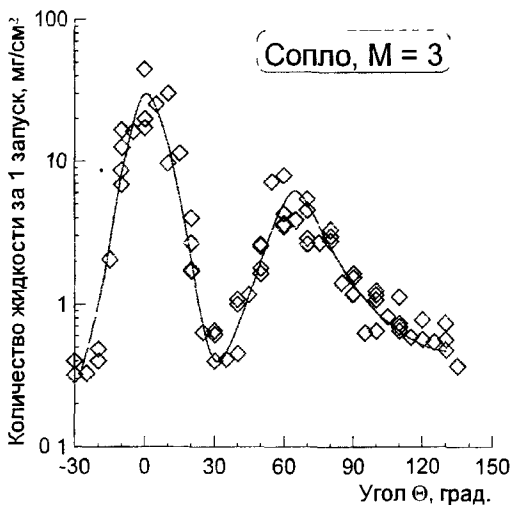


Рис. 9. Угловое распределение капельной фазы за сверхзвуковым соплом



Отчетливо видно возникновение обсуждавшихся ранее двух характерных областей течения капельной фазы – центральной и периферийной. Видно также, что в периферийной области течения капельной фазы существует выделенное направление разлета капель (максимум) под углом около  $65^\circ$  относительно оси и имеют место обратные (при  $\Theta > 90^\circ$ ) потоки капельной фазы. Именно эти потоки являются причиной внешнего загрязнения поверхности МКС струями двигателей ориентации. Условия формирования центральной и периферийной областей и локальные характеристики капель в этих областях (их средние размеры и скорости) существенно различны. По оценкам капли в центральной области мелкие (1-10 мкм) и высокоскоростные (порядка 100 м/сек), в то время как в периферийной области капли относительно крупные (порядка 100 мкм) и низкоскоростные (порядка 1-10 м/сек). Экспериментально показано, что вид угловых распределений капельной фазы в центральной области (один или два максимума) зависит от предыстории течения пленки в сопле (формы и размеров сопла и параметров спутного потока).

На основании выполненных исследований установлена общая структура течения капельной фазы, показанная на рис. 10.

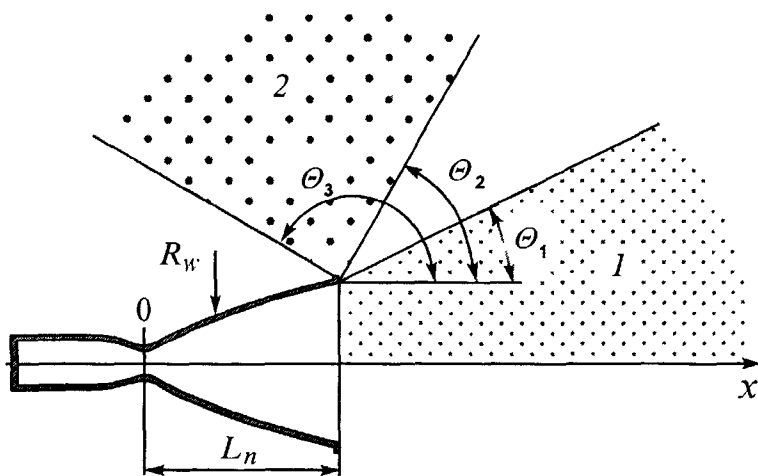


Рис. 10. Общая структура течения капельной фазы  
1 – центральная область, 2 – периферийная область

С использованием техники «лазерного ножа» получены функции распределения каплей по размерам направления и скоростям в периферийной области течения. Результаты по распределениям каплей по размерам приведены на рис. 11 для сопла в виде трубки с разными формами выходной кромки. Форма кромки не оказывает определяющего влияния, однако детальный анализ показывает, что наибольшие обратные потоки каплей дает круглая кромка, наименьшие – прямая

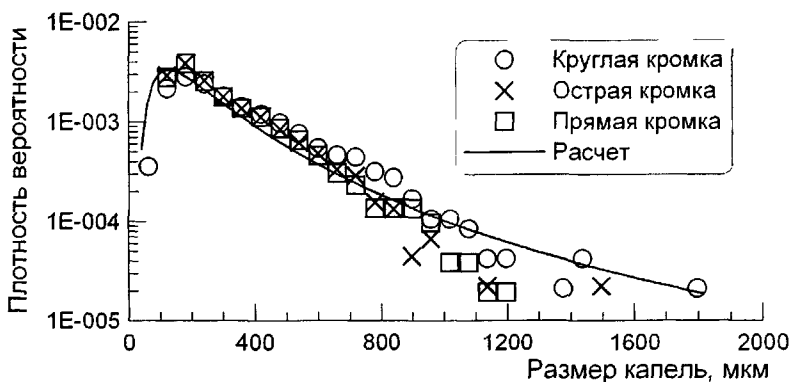


Рис. 11. Функция распределения каплей по размерам в периферийной области течения

Проведено сравнение с результатами расчета по модели С.Ф. Чекмарёва (рис. 11), построенной применительно к условиям экспериментов данной работы.

Пятая глава посвящена анализу возможностей управления угловыми распределениями капельной фазы с целью уменьшения обратных потоков.

Обосновано использование экранов, устанавливаемых на выходную часть сопла, позволяющих снизить динамическое воздействие газа на капли в периферийной области течения капельной фазы.

Экспериментально исследовано влияние относительных размеров и расположения экрана на угловые распределения капельной фазы в потоке и величину давления в межэкранном пространстве.

На основе измерений угловых распределений капельной фазы и электронно-пучковой визуализации структуры течения за соплом без экрана и с экраном показано, что установка экрана не оказывает влияния на течение в центральной области за соплом, но позволяет существенно,

примерно на 2 порядка, уменьшить обратные потоки капельной фазы в периферийной области течения.

Проведенные модельные эксперименты послужили основой для разработки в РКК Энергия им. С.П. Королева специальных газодинамических защитных устройств (экранов), которые были установлены в дальнейшем на двигатели ориентации Служебного Модуля МКС.

С середины 2001 года на борту МКС начались работы по программе космического эксперимента «Кромка 1», одной из главных задач которого являлось исследование в натурных условиях эффективности работы газодинамических защитных устройств, установленных на блоки двигателей ориентации СМ МКС.

На первом этапе эксперимента исследовались характеристики выбросов продуктов неполного сгорания из двигателей ориентации, не оснащенных экранами. Выбрасываемые из двигателей загрязнители накапливались на контрольном планшете «Кромка 1-0», который был установлен космонавтами 15 октября 2001 года на агрегатном отсеке СМ МКС. Планшет представлял собой пластину размером 132 x 228 мм с закрепленными на ней образцами разных материалов. Период экспозиции планшета в открытом космосе составил ~ 100 суток.

На втором этапе, после демонтажа планшета «Кромка 1-0» одновременно с установкой экранов на блоки двигателей СМ 25 января 2002 года был установлен планшет «Кромка 1-1». Демонтаж планшета «Кромка 1-1» произведен экипажем МКС 26 августа 2002 года. Период экспозиции этого планшета в открытом космосе составил ~ 212 суток.

Количественная информация о пространственных распределениях продуктов неполного сгорания была получена компьютерной обработкой отсканированных изображений планшетов. Соответствующие результаты в виде зависимостей интенсивности окраски  $J$  от координат приведены на рис. 12, из которого видно, что при работе двигателей до установки экранов («Кромка 1-0») наблюдаются весьма многочисленные следы капель, которые при обработке дают локальные «выбросы». В то же время при работе двигателей с установленными экранами («Кромка 1-1») следы капель на поверхности контрольной пластины не обнаружены, что приводит к более гладким профилям интенсивности и отсутствию локальных «выбросов». Из рис. 12 также следует, в центральной области течения (что соответствует большим значениям  $Y$  на рис. 12) результаты с экраном и без экрана совпадают, в то время как в периферийной области течения (что соответствует малым значениям  $Y$  на рис. 12) наблюдается

существенное уменьшение количества загрязняющих фракций после установки экранов.

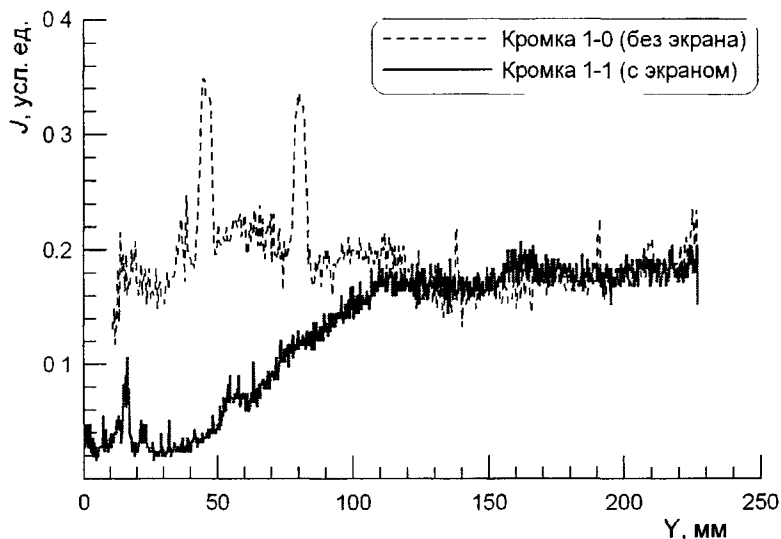


Рис. 12 Влияние экранов на интенсивность загрязнения планшетов

Общий вывод, который можно сделать из анализа приведенных данных – результаты натуральных и модельных экспериментов достаточно хорошо коррелируют между собой: и в модельных, и в натуральных условиях установка экрана существенно ограничивает угол разлета загрязняющих фракций.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

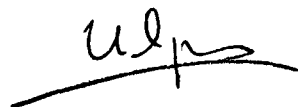
1. Разработан и создан комплекс аппаратуры и диагностических методик для исследований газочастичных потоков в вакууме.
2. Экспериментально исследованы локальные характеристики (толщина и скорость) пленки жидкости при её движении со спутным газовым потоком в сверхзвуковых соплах. Показано, что течение пленки является стрессовым и сопровождается волнообразованием, срывом капель с поверхности пленки и её испарением.
3. Показано существование различных механизмов переноса жидкой фазы на выходную кромку сопла - пленочного (для конического и

- профилированного сопел) и капельного (только для профилированных сопел).
4. Установлена общая структура течения газочапельного потока, формирующегося при истечении пристенной пленки жидкости со спутным газовым потоком из сопла в вакуум. Показано возникновение двух областей течения капельной фазы – центральной и периферийной, существенно отличающихся механизмами образования, а также размерами и скоростями капель в этих областях.
  5. Установлено определяющее влияние величины давления в окружающем пространстве на возвратное движение пленки жидкости по наружной поверхности сопла против сил тяжести при её истечении в вакуум со спутным потоком газа.
  6. Показано возникновение обратных потоков капельной фазы, обусловленных разрушением пристенной пленки жидкости на выходной кромке и внешней поверхности сопла на капли и их взаимодействием с потоком несущего газа.
  7. Выполнен цикл исследований по влиянию экранов на пространственное распределение капельной фазы за сверхзвуковым соплом в вакууме. Показано, что экраны не оказывают влияние на течение в центральной области и позволяют существенно, до двух порядков, уменьшить величину обратных потоков капельной фазы.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

1. **Prihodko V.G., Yarygin I.V., Yarygin V.N.** Ejection of a near wall liquid film accompanied by a supersonic gas flow into vacuum // Proceedings 1st Russian Korean International Symposium on Applied Mechanics RUSKO-AM-2001, Novosibirsk, 2001. – P. 125-128.
2. **Prihodko V.G., Yarygin I.V., Serov A.F., Nazarov A.D.** Motion and Decay of Near-Wall Liquid Film at its Outflow with Cocurrent Gas Flow from the Cylindrical Channel into Vacuum. // Proceedings XI International Conference on the Methods of Aerophysical Research ICMAR'2002, Novosibirsk. – 2002. – Part 1. – P. 168-172.
3. **Ярыгин И.В.** Движение и распад пристенной пленки жидкости при её истечении со спутным газовым потоком в вакуум // VII Всеросс. конференция молодых ученых «Актуальные проблемы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Новосибирск. – 2002. – С. 98-99.
4. **Ярыгин В.Н., Приходько В.Г., Ярыгин И.В., Герасимов Ю.И., Крылов А.Н.** Газодинамические аспекты проблемы загрязнения Международной космической станции. Часть 1. Модельные

- эксперименты. Теплофизика и Аэромеханика, – 2003. – Т. 10, №2. – С. 279-296.
5. Герасимов Ю.И., Крылов А.Н., Соколова С.П., Приходько В.Г., Ярыгин В.Н., Ярыгин И.В., Ребров С.Г., Буряк А.К. Газодинамические аспекты проблемы загрязнения Международной космической станции. Часть 2. Натурные эксперименты. Теплофизика и Аэромеханика, – 2003. – Т. 10, №4. – С. 575-586.
  6. Приходько В.Г., Чекмарёв С.Ф., Ярыгин В.Н., Ярыгин И.В. Сверхзвуковое истечение газа из сопла в вакуум с пристенной пленкой жидкости: эффект подъема пленки по наружной поверхности сопла против сил тяжести // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 394, № 5. – С. 618-620.
  7. Prikhodko V.G., Chekmarev S.F., Yarygin I.V., Yarygin V.N. Droplet size, direction-of-fly and velocity distributions in a supersonic gas-droplet flow expanding into vacuum // Proceedings XII International Conference on the Methods of Aerophysical Research ICMAR'2004, Novosibirsk, 28 June - 3 July 2004. – Part 1. – P. 183-188.
  8. Prikhodko V.G., Serov A.F., Nazarov A.D., Yarygin I.V., Levchenko V.F. Research of the Local Characteristics of A Near-wall Liquid Film in Supersonic Conical Nozzle with a Co-current Gas Flow // Proceedings XII International Conference on the Methods of Aero-physical Research ICMAR'2004, Novosibirsk, 28 June - 3 July 2004. – Part 1. – P. 189-193.
  9. Yarygin I.V., Levchenko V.F. Measurement and calculation of thickness and velocity of a near-wall liquid film at motion with a co-current gas flow in a supersonic nozzle // Proceedings XII International Conference on the Methods of Aerophysical Research ICMAR'2004, Novosibirsk, 28 June - 3 July 2004. – Part 4. – P.314-139.
  10. Приходько В.Г., Тимошенко Н.И., Ярыгин И.В. Некоторые вопросы диагностики сверхзвуковых газокапельных течений в вакууме // XX Юбилейный Международный семинар по струйным, отрывным и нестационарным течениям, Санкт-Петербург – 2004. – С. 214-215.
  11. Приходько В.Г., Чекмарев С.Ф., Ярыгин И.В., Ярыгин В.Н. Истечение газа из сопла в вакуум с пристенной пленкой жидкости // XXVII Сибирский теплофизический семинар: Труды конференции, Новосибирск, 1-5 октября. – 2004. CD. – ISBN-5-89017-027-9, №120.
  12. Ярыгин И.В. Газокапельные протоки из осесимметричных каналов вакуум // VIII Всероссийская конференция молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики», Новосибирск, 2004. – С. 58-59.



Подписано к печати 25 апреля 2005 г. Заказ № 167  
Формат 60x84/16. Объем 1 уч.-изд. л. Тираж 120 экз.

---

Отпечатано в Институте теплофизики СО РАН  
630090, Новосибирск, пр. Акад Лаврентьева, 1

**№-9302**

РНБ Русский фонд

2006-4

15528