

УДК 532.529

Межфазное трение и массообмен при истечении газа в вакуум из сопла с пристенной пленкой жидкости*

В.Н. Ярыгин, В.Г. Приходько, И.В. Ярыгин, А.Д. Назаров

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск

E-mail: yarygin@itp.nsc.ru

Выполнен цикл экспериментальных исследований взаимодействия спутного газового потока с пристенной пленкой жидкости при высоких, включая сверхзвуковые, скоростях газового потока. С помощью зондов емкостного типа измерены локальные параметры пристенной пленки. Показано, что спутный газовый поток оказывает сильное воздействие на пристенную пленку, приводя к интенсивному волнообразованию, срыву капель с поверхности пленки и их уносу газовым потоком. Установлено, что относительное количество жидкости, уносимой спутным потоком, обобщается по числу Вебера газового потока.

Ключевые слова: пристенная пленка, спутный поток, капли, массообмен, межфазное трение.

Введение

Течение жидкости в виде тонких пленок (толщиной менее 1 мм) широко используется в различных тепломассообменных аппаратах и устройствах (конденсация неподвижного и движущегося пара, абсорбция или десорбция газа, сушка, дистилляция, фракционирование, химико-технологические процессы и пр.). Другое важное приложение пленочных течений — защита стенок от воздействия высокотемпературного газового потока (например, использование пристенной топливной пленки в жидкостных ракетных двигателях для защиты камеры сгорания и сверхзвукового сопла). Широкое применение для этих целей получили также пристенные газовые завесы [1].

Взаимодействие пристенной пленки со спутным газовым потоком существенным образом определяется параметрами этого потока, такими как скорость, плотность, статическое давление. Даже при малых скоростях потока пленка жидкости теряет устойчивость и на ее поверхности образуются капиллярные волны, в то время как без спутного потока течение пленки является безволновым. Увеличение скорости спутного газового потока усиливает межфазное взаимодействие, приводя к формированию двух- и трехмерных волн на поверхности пленки. Начиная с некоторых значений скорости и плотности газового потока (числа Вебера) имеет место отрыв капель с поверхности пленки и их унос спутным потоком [2].

* Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант №13-08-00410).

Другая важная особенность заключается во взаимодействии пристенной пленки со спутным градиентным потоком, например, в соплах. Сильное падение статического давления в потоке (примерно в 2 раза для чисел Маха, равных 1, и в 30 раз для чисел Маха, равных 3) может приводить к ситуации, когда статическое давление в потоке над пленкой становится ниже давления насыщенных паров жидкости. Это может приводить к вскипанию и испарению пленки и появлению поперечного потока пара с поверхности пленки в пограничный слой. Этот поток пара, по аналогии со вдувом через проницаемую стенку в пограничный слой, может существенным образом влиять на величину межфазного трения, приводя к уменьшению касательного напряжения на границе «газ–жидкость» по сравнению с режимами взаимодействия газа с пленкой без ее кипения и испарения. В литературе практически отсутствуют результаты, которые бы давали точные и достоверные данные по величинам касательного напряжения на границе раздела «газ–жидкость» в условиях высоких относительных скоростей спутного потока. Эта ситуация может частично объясняться тем, что не существует подходов к прямому измерению величины трения на межфазной границе, особенно в условиях интенсивного волнообразования, срыва капель с поверхности пленки, ее кипения и испарения. Способы оценки этого значения основаны на измерении других параметров, например, снижения давления вдоль канала. Однако такой подход позволяет получить только значение межфазного трения, усредненное по длине канала. Для высоких относительных скоростей спутного потока не существует достоверных методов расчета величины межфазного трения.

В настоящее время опубликовано большое количество данных по течениям жидких пленок [3]. Наиболее интенсивные исследования посвящены гравитационным пленкам. Во многих работах описывают стрессовые течения пленок. Однако эти эксперименты проведены при относительно низких скоростях спутного потока, порядка 10 м/с. В настоящей работе исследования взаимодействия спутного газового потока с пристенной пленкой жидкости выполнены при высоких, включая сверхзвуковые, скоростях газового потока.

Стимулом к постановке и проведению этих исследований было решение проблемы внешнего загрязнения космических аппаратов, включая Международную космическую станцию (МКС), струями двигателей управления и ориентации (ДО), в которых топливная пленка используется для охлаждения стенок сопла [4]. В настоящее время на МКС установлены ДО, работающие на самовоспламеняющихся компонентах топлива, — несимметричный диметилгидразин (гептил, горючее) и тетраоксид азота (амил, окислитель). Элементы внешней поверхности МКС, попадающие в поле течения выхлопного факела двигателя, подвергаются силовому, тепловому и загрязняющему воздействию. Поскольку используемые в ДО компоненты топлива являются токсичными, то возможное попадание оседающих на поверхности станции продуктов сгорания внутрь станции со скафандрами космонавтов во время сеансов их выхода в открытый космос представляет большую опасность.

Впервые на проблему загрязняющего воздействия струй ДО обратили внимание при эксплуатации космической станции МИР. В рамках натурального эксперимента «Движкон», проведенного на орбите в 1998 году, было установлено наличие загрязнений на различных участках внешней поверхности вокруг ДО станции МИР. Однако большое внимание проблеме загрязнения стали уделять только на МКС. Вопрос оказался настолько серьезным, что космонавтам были предписаны конкретные меры предосторожности при работе в открытом космосе [5].

В настоящей работе рассматриваются вопросы моделирования ДО МКС в вакуумных камерах. Основное внимание уделено исследованию процессов взаимодействия газового потока с пристенной пленкой внутри сопла.

Постановка исследований и вопросы моделирования

С точки зрения постановки задачи речь идет об истечении пристенной пленки жидкости со спутным газовым потоком из сверхзвукового сопла в вакуум. Конечно, речь может идти только о приближенном моделировании, даже если в вакуумной камере испытывается натурный ДО. Вопрос становится еще более сложным, когда вместо компонентов топлива используются модельные жидкости. Воспроизвести в модельном эксперименте истинную толщину пленки на срезе сопла, ее состав и температуру, а также параметры высокотемпературного газового потока продуктов сгорания весьма проблематично. Тем не менее, даже приближенное моделирование позволяет при возможно более полном воспроизведении определяющих параметров получить необходимую информацию о структуре течения и, в первую очередь, жидкокапельной фазы.

В работе [6] экспериментально обнаружено, что пристенная пленка жидкости, истекающая в вакуум из сопла, на выходной кромке сопла разворачивается на 180° и двигается по наружной поверхности сопла в обратном направлении, создавая обратный (загрязняющий) поток капельной фазы. Из этого был сделан вывод об определяющей роли характера взаимодействия пленки жидкости со стенкой и спутным газовым потоком на динамику поведения пленки внутри сопла и ее дальнейшую эволюцию при истечении в вакуум.

Таким образом, в качестве основных критериев моделирования пристенной пленки жидкости могут быть приняты параметры пленки в выходном сечении сопла — ее толщина δ_l и средняя скорость V_l , либо толщина δ_l и величина касательного напряжения τ на границе раздела “газ–жидкость”. В предположении линейного распределения скорости в пристенной пленке $\tau = \mu_l \frac{dV}{dy} = 2\mu_l \frac{V_l}{\delta_l}$ измеренные величины толщины и скорости пристенной пленки связаны с величиной касательного напряжения следующим образом [7]:

$$\delta_l = \sqrt{\frac{2G_l \mu_l}{\pi d \rho_l \tau}}, \quad (1)$$

$$V_l = \sqrt{\frac{G_l \tau}{2\pi d \rho_l \mu_l}}. \quad (2)$$

где G_l , ρ_l , μ_l — расход, плотность и вязкость жидкости, соответственно.

Другим важным условием моделирования натурального процесса является выбор основных параметров сверхзвукового сопла — его геометрических параметров, числа Маха, рода газа, его температуры и расхода или давления торможения. Обычно стараются воспроизвести натурные значения числа Маха M_a и отношение удельных теплоемкостей γ . Если с воспроизведением чисел Маха нет особых сложностей, то воспроизвести в модельном эксперименте натурное значение γ для высокотемпературных продуктов сгорания весьма проблематично. В этой ситуации целесообразно перейти к интегральным характеристикам струй, истекающих в вакуум. В наших исследованиях принята концепция моделирования по характерному углу расширения струи Θ , определяемому через относительный импульс струи \bar{J} [8, 9]:

$$\Theta = \arctg \left(\frac{1 - \bar{J}}{\bar{J}} \right)^{0,5}, \quad (3)$$

$$\bar{J} = \left(1 + \frac{1}{\gamma M_a^2} \right) \left(1 + \frac{2}{(\gamma - 1) M_a^2} \right)^{-0,5}, \quad (4)$$

где $\bar{J} = J_a / GV_{\max}$, J_a , G , V_{\max} — импульс газа на срезе сопла, расход и максимальная скорость газа в струе соответственно. При таком подходе в эксперименте необходимо воспроизвести величину относительного импульса натурального ДО. Для ДО, установленных на МКС, эта величина составляет $\bar{J} = 0,87$ ($M_a = 4,3$, $\gamma = 1,24$, суммарный расход топлива около 50 г/с). Тогда, исходя из принятого условия моделирования $\bar{J}_m = \bar{J}_n$ и при использовании воздуха ($\gamma = 1,4$) в качестве модельного газа, число Маха модельного сопла $M_a = 2,94$, что соответствует отношению диаметров выходного и критического сечений сопла $D_a/D_* = 2$. Остальные параметры модельного сопла — диаметр критического сечения, расходы газа и жидкости и другие — выбирались по условиям моделирования пристенной пленки жидкости и расходным параметрам экспериментальной установки.

Экспериментальная установка и методы диагностики

В настоящее время существует довольно много методов измерения локальных характеристик пристенных пленок, в первую очередь их толщин. Обзор этих методов можно найти, например, в работе [3]. В настоящей работе измерения локальных параметров пристенной пленки жидкости (толщина пленки и ее скорость) проводились с помощью датчиков емкостного типа. Схемы рабочих участков приведены на рис. 1. Пристенная пленка формировалась путем подачи жидкости через кольцевой зазор величиной 0,1 мм в форкамере сопла. Хотя основным рабочим участком было сверхзвуковое сопло, часть экспериментов была проведена с цилиндрической трубкой (вариант звукового сопла), которая позволила провести эксперименты при скоростях спутного потока газа от 0 до 300 м/с, в то время как эксперименты со сверхзвуковым соплом могли быть проведены только при скоростях спутного потока около 540 м/с.

В экспериментах использовались коаксиальные емкостные датчики с диаметром внешнего электрода 1,6 мм, внутреннего — 0,5 мм. Датчики были заделаны заподлицо с внутренней поверхностью сопла. Для измерения толщины пленки четыре датчика 1 располагались через 90° по периметру сопла на расстоянии 2 мм от его выходной кромки. Показания усреднялись по четырем зондам, что позволило повысить надежность и точность измерений толщины пленки. Для измерения скорости переднего фронта пленки и скорости волн на ее поверхности использовались два зонда 2. Зонд 2 располагался на расстоянии 5 мм от зонда 1. Частота измерений зондов составляла 1 кГц. Детальное описание принципов и методики измерений можно найти в работе [10].

В экспериментах в качестве рабочей жидкости использовался в основном этанол, по физическим свойствам близкий к гептилу, используемому для создания охлаждающей

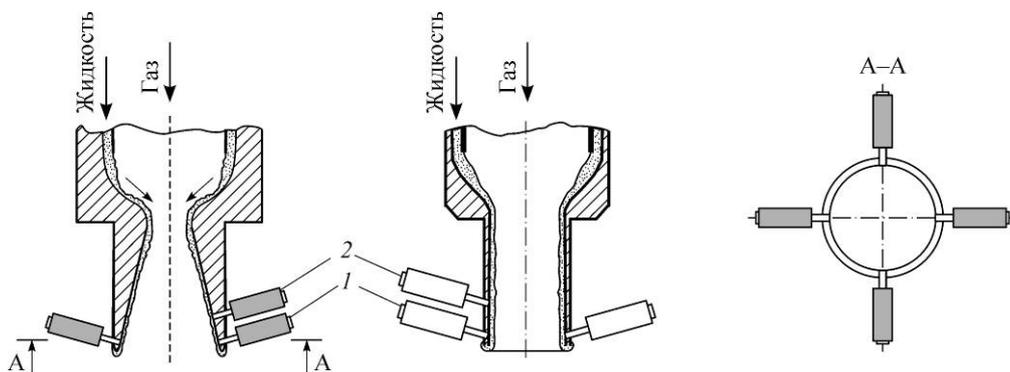


Рис. 1. Схемы расположения датчиков.

Расположение датчиков: в продольном сечении сопла — в сверхзвуковом (слева) и звуковом (по центру) соплах, в поперечном сечении сопла — в сверхзвуковом и звуковом соплах (справа); 1, 2 — измерительные зонды.

пленки жидкости в ДО МКС. В части экспериментов в качестве рабочей жидкости использовался бутанол, у которого давление насыщенных паров при комнатной температуре примерно на порядок ниже, чем у этанола, а остальные свойства, кроме вязкости, примерно одинаковы.

Экспериментальные исследования проводились на вакуумной газодинамической установке “ВИКИНГ” Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН [11]. Большой объем вакуумной камеры (около 150 м^3) обеспечивает широкие возможности для работы в импульсных режимах. Длительность импульса, как правило, не превышала пяти секунд.

В экспериментах число Рейнольдса газового потока, определяемое через расход газа G как

$$\text{Re}_{\text{газ}} = \frac{4G}{\mu_{\text{газ}} \pi D_*},$$

где $\mu_{\text{газ}}$ — вязкость газа, D_* — диаметр критического сечения сопла, варьировалось в диапазоне $4 \cdot 10^4 - 3,5 \cdot 10^5$. Число Рейнольдса пленки жидкости в критическом сечении сопла, определяемое через расход жидкости G_l как

$$\text{Re}_l = \frac{G_l}{\mu_l \pi D_*},$$

изменялось в диапазоне от 7 до 14 для этанола и от 2,5 до 5,3 для бутанола.

Результаты экспериментов и их анализ

Прежде всего, выделим важные особенности взаимодействия пристенной пленки жидкости со спутным газовым потоком в условиях рассматриваемой задачи.

Сильное падение давления в спутном газовом потоке. Как отмечалось выше, для выбранного сопла ($M_a = 3$) и рода газа (воздух) давление в спутном газовом потоке над пленкой падает примерно в 30 раз. Это означает, что для максимальных, в условиях настоящей работы, значений давлений газа в форкамере сопла $p_0 \approx 10^3$ мм рт. ст. давление газа на срезе сопла p_a будет равно примерно 33 мм рт. ст., что ниже давления насыщенных паров этанола ($p_{\text{нас}} \approx 44$ мм рт. ст.) при комнатной температуре. Формально это означает, что пленка этанола в выходном сечении сопла становится перегретой и должна начать испаряться или кипеть. Для бутанола ($p_{\text{нас}} \approx 5$ мм рт. ст.) этот эффект может проявляться при давлениях в потоке примерно на порядок ниже, чем для этанола.

Сильное взаимодействие спутного газового потока с пристенной пленкой жидкости, приводящее к волнообразованию и интенсивному срыву капель. Спутный поток в условиях проведенных экспериментов должен оказывать очень сильное влияние на пленку, вызывая волнообразование и унос капель с ее поверхности. Формальным обоснованием высказанному предположению являются большие числа Вебера We , реализующиеся в экспериментах. По оценкам их максимальные значения близки к 200. Это достаточно высокие числа Вебера, и согласно обзору [2], в условиях экспериментов настоящей работы должен иметь место интенсивный унос капель.

Уменьшение толщины пленки жидкости за счет геометрического фактора. Поскольку сверхзвуковая часть сопла является расходящимся каналом, то формально толщина пленки должна уменьшаться пропорционально $1/D$, т. е. для выбранного сопла с $D_a/D_* = 2$ при движении от критического сечения до выходного толщина пленки δ_l и число Рейнольдса пленки Re_l должны уменьшиться в два раза.

Разрыв пристенной пленки жидкости при малых расходах. При проведении экспериментов было замечено, что по мере уменьшения расхода жидкости возникает момент,

когда на срезе сопла наблюдается не сплошная пленка, а отдельные ручейки-струйки. Этот эффект ограничивал минимальный расход жидкости в экспериментах. Процесс разрыва не исследовался в настоящей работе, в частности, из-за трудностей наблюдения стекания пленки по внутренней поверхности сопла. Эффект разрыва пленок и образования сухих пятен в испаряющихся пленках жидкости детально изучался в работах [12, 13].

Приведем теперь основные результаты исследований для сверхзвукового сопла. На рис. 2 представлены временные диаграммы толщин пленки этанола, полученные при изменении давления газа в форкамере p_0 (и, соответственно, давления в потоке над пленкой) примерно на порядок (от 820 до 100 мм рт.ст.). При этом число Re_l было одинаковым во всех четырех режимах и составляло $Re_l = 14$. Видно, что по мере понижения давления в потоке над пленкой (от 24 мм рт. ст. для $p_0 = 820$ мм рт. ст. до 3 мм рт. ст. для $p_0 = 100$ мм рт. ст.) процессы испарения-кипения оказывают все более сильное влияние на поведение пленки, вызывая все большие флуктуации поверхности пленки и рост ее средней толщины. Для бутанола этот эффект был выражен менее существенно и наблюдался слабо только при минимальном давлении $p_0 = 100$ мм рт. ст.

Использование двух последовательно расположенных зондов позволило выявить корреляцию показаний и измерить скорость переднего фронта пленки и крупных

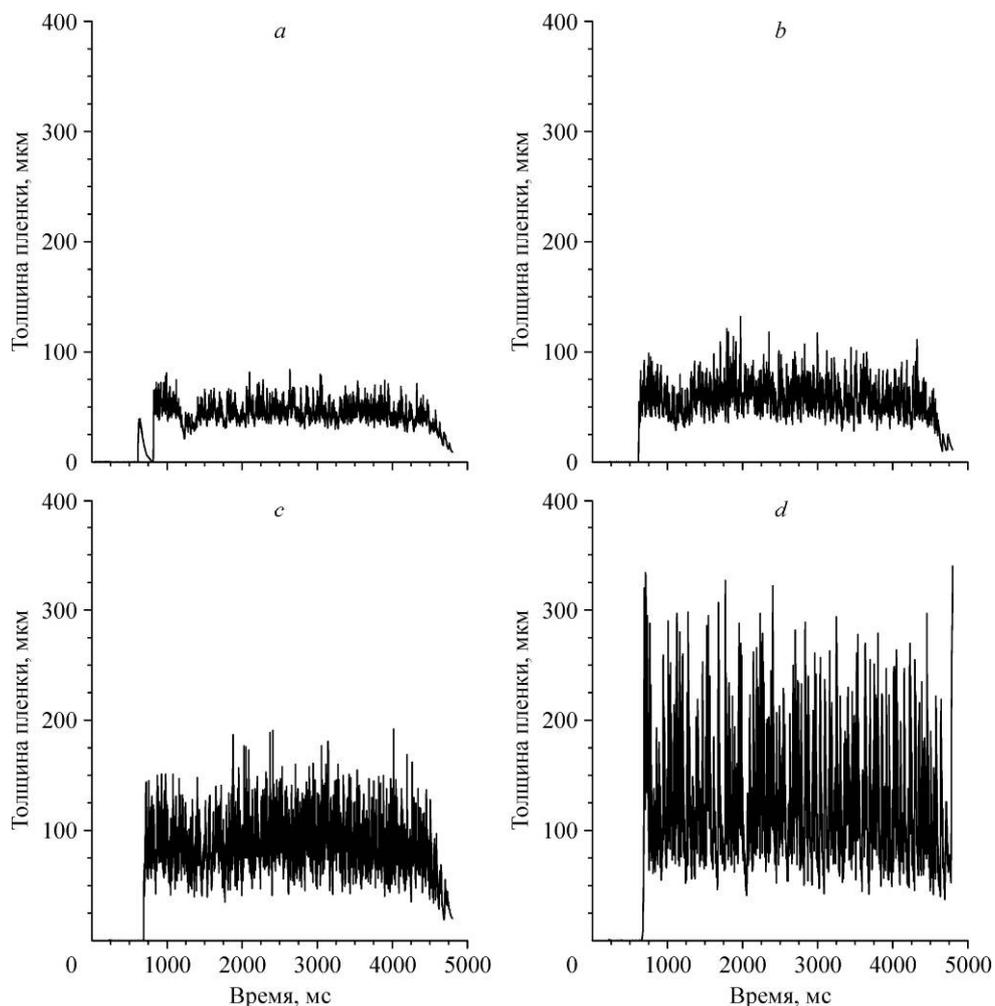


Рис. 2. Временные диаграммы толщин пленки этанола для разных p_0 .
 $p_0 = 820$ (a), 580 (b), 340 (c), 100 (d) мм рт. ст.

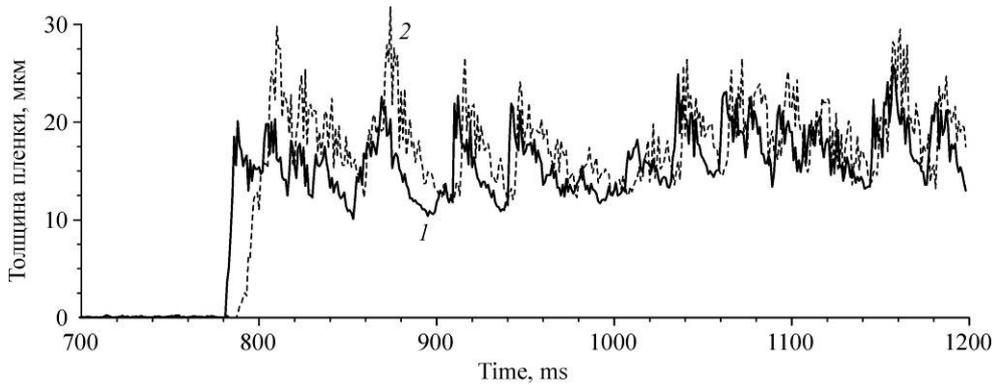


Рис. 3. Толщина пленки этанола, измеренная двумя последовательно расположенными датчиками. $Re_l = 14$.

1 — первый зонд (выше по потоку), 2 — второй зонд (ниже по потоку).

волн. На рис. 3 показана часть временной диаграммы толщины пленки в промежутке от 700 до 1200 мс по показаниям первого и второго зондов. Хорошо виден момент прихода пленки на первый и второй датчики. Можно отметить корреляцию показаний по амплитуде и форме сигналов и наличие некоторой периодической волновой структуры с характерным временным масштабом ≈ 50 мс (с частотой ≈ 20 Гц). Видно также, что волны имеют крутой фронт, затем идет пологая часть, на поверхности которой движутся более мелкие волны. По временной задержке между показаниями датчиков определена скорость переднего фронта пленки жидкости и скорость волн на поверхности пленки. Анализ полученных результатов показал, что скорость переднего фронта пленки жидкости примерно в два раза меньше скорости волн на поверхности пленки, а их характерные значения составляют 0,5 и 1 м/с соответственно.

Проведенные исследования позволили определить средние толщины пленок в сверхзвуковом сопле. Соответствующие экспериментальные данные для бутанола и этанола приведены на рис. 4 и 5 соответственно. На этих же рисунках сплошными

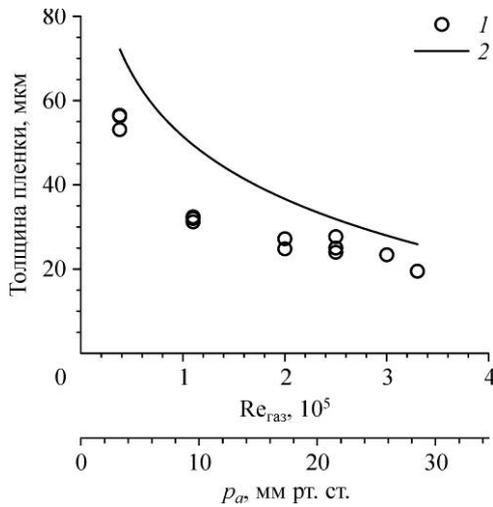


Рис. 4. Экспериментальные и расчетные данные при различных $Re_{газ}$ по толщине пленки бутанола.

$Re_l = 5,3$; p_a — давление в потоке над пленкой в точке измерения; 1 — эксперимент, 2 — расчет.

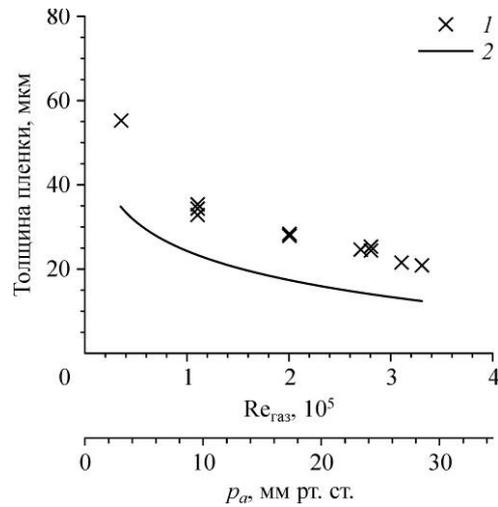


Рис. 5. Экспериментальные и расчетные данные при различных $Re_{газ}$ по толщине пленки этанола.

$Re_l = 14$; p_a — давление в потоке над пленкой в точке измерения; 1 — эксперимент, 2 — расчет.

линиями показаны результаты расчетов средних толщин пленок для условий экспериментов по формуле (1). Для этих расчетов необходимо знать величину касательного напряжения τ . Как отмечалось выше, в настоящее время в литературе отсутствуют данные для определения τ на внешней границе пленки при наличии высокоскоростного, в том числе сверхзвукового, спутного газового потока. Однако вследствие малой толщины пристенной пленки жидкости величина касательного напряжения τ на внешней поверхности пленки в качестве первого приближения может быть принята равной величине τ_w на стенке сопла в отсутствии пленки. Несмотря на простоту принятой модели, она позволяет оценить толщину и скорость пленки при движении внутри сопла со спутным потоком газа. Соответствующие зависимости для τ в сверхзвуковом градиентном потоке брались из работы [14] и имели следующий вид:

$$C_f = \frac{2\tau}{\rho V^2} = 0,0131 \text{Re}^{** - 1/6}, \quad (5)$$

где Re^{**} определяется из уравнения

$$\text{Re}^{** 7/6} = \frac{0,0076}{\nu^{2,75}} \int_0^x V^{3,75} dx. \quad (6)$$

Первое, на что можно обратить внимание при анализе представленных на рис. 4 и 5 результатов, это то, что для бутанола расчетные данные идут выше экспериментальных, а для этанола — наоборот, что может быть объяснено следующим образом. Рассмотрим сначала результаты с бутанолом (рис. 4). По-видимому, можно полагать, что в рассматриваемых условиях основными процессами воздействия спутного потока на пленку бутанола являются волнообразование и срыв капель, а эффект кипения пленки несущественен и его проявление сказывается только при малых p_0 (малых $\text{Re}_{\text{газ}}$ на рис. 4). И волнообразование, и срыв капель должны приводить к увеличению τ на границе раздела по сравнению с заданной в расчетах величиной τ на гладкой твердой стенке. Поскольку $\delta_l \sim 1/\sqrt{\tau}$, то учет в расчетной модели более высоких значений τ приведет к понижению расчетных значений δ_l и их сближению с экспериментальными данными.

Обратимся теперь к опытным данным для этанола (рис. 5). Здесь главное отличие от бутанола состоит в кипении пленки этанола, особенно при малых p_0 , как это видно из рис. 2. Остальные два эффекта — волнообразование и срыв капель — тоже, конечно, присутствуют, но эффект кипения (взбухания пленки) является, по-видимому, определяющим. Главный вопрос: как он влияет на τ . Из сравнения расчетных и экспериментальных данных, приведенных на рис. 5, следует, что τ при кипении пленки должно уменьшаться, т.е. изменяться в противоположную сторону по сравнению с изменением τ при волнообразовании и срыве капель. Приведенные рассуждения кажутся правдоподобными, если согласиться с существованием аналогии между процессами испарения и вдува вещества через проницаемую стенку. В качестве иллюстрации на рис. 6, взятом в оригинале из работы [15], приведено распределение коэффициента теплоотдачи (числа Нуссельта) по длине сверхзвукового сопла. Видно, что коэффициент теплоотдачи имеет максимальное значение в критическом сечении сопла. Аналогичным образом должно вести себя и касательное напряжение. Известно также, что вдув уменьшает коэффициент теплоотдачи, поэтому испарение жидкости с межфазной поверхности должно приводить к ослаблению силового взаимодействия спутного потока газа с пристенной пленкой жидкости, а при конденсации пара из потока на поверхность пленки — наоборот.

Рис. 6. Распределение числа Нуссельта по длине сопла [15].

В верхней части рисунка линия — расчеты, символы — экспериментальные данные.

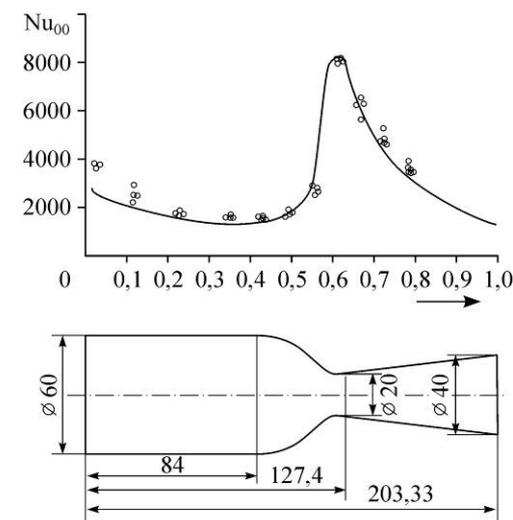
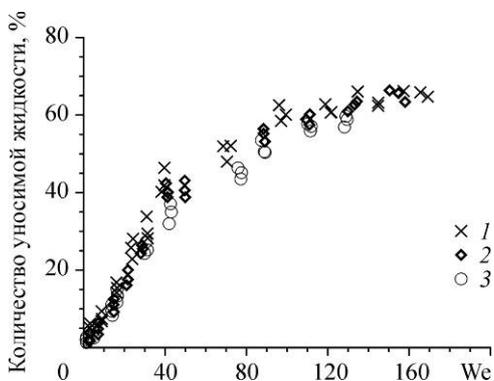
В части экспериментов исследовался срыв жидкости в виде капель с поверхности пленки и их унос спутным потоком. Количество сорванной с поверхности пленки жидкости определялось следующим образом. Измерялся начальный расход жидкости. По измеренным значениям средней толщины пленки жидкости и ее скорости в выходном сечении канала определялось количество жидкости, оставшейся в пленке. Разница начального и конечного расходов жидкости принималась как унесенная спутным потоком. В основном эти исследования были проведены для цилиндрического канала, так как только в этом случае имелась возможность в широких пределах (от 0 до 300 м/с) изменять скорость спутного газового потока (изменением давления в вакуумной камере), в то время как скорость газа в выходном сечении сверхзвукового сопла была постоянной и составляла около 540 м/с. Как показали эксперименты, количество жидкости, срываемой и уносимой спутным потоком, может достигать 70 % от ее начального расхода. Было установлено, что, как и в работе [2], количество уносимой спутным потоком жидкости может быть обобщено по числу Вебера:

$$We = \frac{\rho_{\text{газ}} V_{\text{газ}}^2 \delta_l}{2\sigma},$$

где $\rho_{\text{газ}}$ — плотность газа, $V_{\text{газ}}$ — скорость газа, δ_l — измеренные значения средней толщины пленки жидкости, σ — коэффициент поверхностного натяжения. Соответствующие результаты приведены на рис. 7.

Заключение

Представленные результаты получены применительно к моделированию условий работы ДО МКС; вместе с тем они представляют самостоятельную ценность для понимания особенностей взаимодействия пристенной пленки жидкости с высокоскоростным спутным потоком газа. Проведенные исследования позволили определить параметры



пленки в выходном сечении и ее эволюцию при истечении в вакуум. В дальнейшем были предложены способы и устройства, позволившие существенно, на порядки, снизить загрязняющее воздействие факелов ДО на внешнюю поверхность МКС [16].

Рис. 7. Зависимость количества уносимой жидкости (этанола) от числа Вебера.

$Re_l = 10$; $\rho_0 = 735$ (1), 600 (2), 300 (3) мм рт. ст.

Список литературы

1. Волчков Э.П. Пристенные газовые завесы. Новосибирск: Наука, 1983. 239 с.
2. Гогонин И.И. Теплообмен при конденсации движущегося пара внутри вертикальных труб (обзор) // ИФЖ. 2004. Т. 77, № 2. С. 167–180.
3. Алексеев С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск, Наука. 1992. 256 с.
4. Gerasimov Yu.I., Yarygin V.N. Problems of gas-dynamical and contaminating effect of exhaust plumes of orientation thrusters on space vehicles and space stations // Proc. 25th Int. Symp. On Rarefied Gas Dynamics (RGD25), St.-Petersburg, Russia, 21-28 July 2006. Novosibirsk, 2007. P. 805–811.
5. Афанасьев И.Б. Коварная «Кромка» // Новости космонавтики. 2004. № 4. С. 15–16.
6. Приходько В.Г., Ярыгин В.Н. Возникновение возвратного движения пристенной пленки жидкости при ее истечении из цилиндрического канала в вакуум // Теплофизика и аэромеханика. 2000. Т. 7, № 4. С. 459–462.
7. 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 // Proc. XII Intern. Conf. on the Methods of Aerophysical Research ICMAR'2004, Novosibirsk, 2004. Part 4. P. 314–319.
8. Герасимов Ю.И. Параметры подобия в задаче о взаимодействии свободно расширяющейся струи с пластиной // Изв. АН СССР. МЖГ. 1981. № 2. С. 169–173.
9. Мурзинов И.Н. Параметры подобия при истечении сильно недорасширенных струй в затопленное пространство // Изв. АН СССР. МЖГ. 1971. № 4. С. 143–148.
10. Серов А.Ф., Котов С.В., Назаров А.Д., Павленко А.Н., Печеркин Н.И., Чехович В.Ю. Емкостной измеритель локальной толщины пленки жидкости // Приборы и техника эксперимента. 1997. Т. 40, № 1. С. 136–139.
11. Приходько В.Г., Храмов Г.А., Ярыгин В.Н. Крупномасштабная криогенно-вакуумная установка для исследования газодинамических процессов // Приборы и техника эксперимента. 1996. № 2. С. 162–164.
12. Pavlenko A.N., Lel V.V. Heat transfer and crisis phenomena in falling films of cryogenic liquid // Russian J. Engng Thermophys. 1997. Vol. 7, No. 3–4. P. 177–210.
13. Pavlenko A.N., Lel V.V., Serov A.F., Nazarov A.D., Matsekh A.D. The growth of wave amplitude and heat transfer in falling intensive evaporating liquid films // Russian J. Engng Thermophysics. 2002. Vol. 11, No. 1. P. 7–43.
14. Теоретические основы теплотехники. Теплофизический эксперимент. Справочник / Под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоатомиздат, 1988. 560 с.
15. Кутателадзе С.С., Леонтьев А.И. Турбулентный пограничный слой сжимаемого газа. Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1962. 180 с.
16. Ярыгин В.Н., Герасимов Ю.И., Крылов А.Н., Мишина Л.В., Приходько В.Г., Ярыгин И.В. Газодинамика космических кораблей и орбитальных станций // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 3. С. 345–372.

Работа поступила в редакцию 16 мая 2013 г.