

УДК 532.529

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ИСПАРЕНИЯ ПРИСТЕННЫХ ПЛЕНОК ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ИЗ СОПЛА В ВАКУУМ

В. Н. Ярыгин, В. Г. Приходько, И. В. Ярыгин

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mails: yarygin@itp.nsc.ru, prihodko@itp.nsc.ru, yarygin@gorodok.net

Экспериментально исследуется истечение имеющих различные физические свойства пристенных пленок жидкостей со спутным высокоскоростным газовым потоком из сопла в вакуум. Измерены локальные параметры пленки жидкости внутри сопла. Исследована структура газочапельного потока за срезом сопла в вакууме. Измерены предельные температуры охлаждения пленок жидкости, формирующихся на внешней поверхности сопла.

Ключевые слова: пристенная пленка жидкости, спутный газовый поток, межфазное взаимодействие, срыв капель, истечение в вакуум, испарение пленки.

DOI: 10.15372/PMTF20180505

Введение. Исследование истечения жидкостей и газожидкостных смесей в вакуум имеет как теоретическое, так и практическое значение. Теоретический интерес представляет изучение таких физических процессов и явлений, сопровождающих истечение жидкости в вакуум, как мгновенное вскипание, распад на капли, фазовые переходы на поверхности и внутри капель, взаимодействие капель со сверхзвуковым газовым потоком и т. д. На практике процесс истечения жидкости в вакуум используется в космической технике при работе дренажных устройств, двигателей управления и ориентации, систем дозаправки компонентами топлива, что приводит к загрязнению поверхностей космических аппаратов, а также в фармацевтике при получении наноразмерных форм лекарственных препаратов. Несмотря на то что струйное истечение газа в вакуум экспериментально и теоретически исследовалось во многих работах (см., например, [1]), задача совместного истечения газового потока с жидкостью, в частности с пристенной пленкой, изучена недостаточно. Следует отметить, что в настоящее время опубликовано большое количество работ, в которых рассматриваются течения пленок жидкостей. Наиболее интенсивно изучались гравитационные пленки, исследование которых начато в классических работах [2, 3]. Важную роль в таких течениях играют механизмы неустойчивости, приводящие к развитию и взаимодействию волн с различными характеристиками. При этом существенное влияние могут оказывать термокапиллярная неустойчивость и фазовые превращения, причем конденсация оказывает стабилизирующее воздействие, а испарение дестабилизирует течение. Основные результаты этих исследований приведены в работах [4–6].

Также существует большое количество публикаций, посвященных изучению стрессовых течений пленок, т. е. пленок, движущихся под действием касательных напряжений

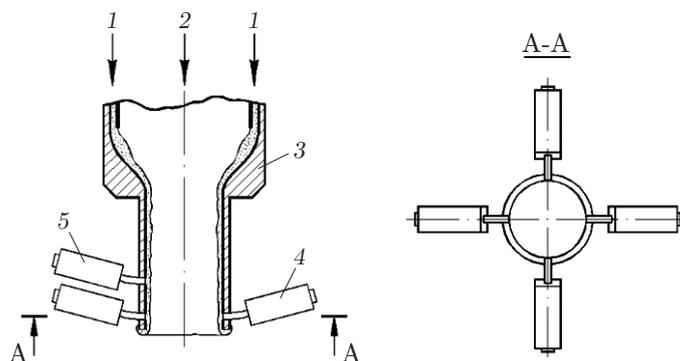


Рис. 1. Схема рабочего участка:

1 — жидкость, 2 — газ, 3 — сопло, 4 — датчики для измерения толщины, 5 — датчик для измерения скорости

на межфазной границе, однако эти исследования проведены в основном при относительно небольших скоростях спутного газового потока (порядка 10 м/с) и давлениях, близких к атмосферному. Взаимодействие пристенной пленки со спутным газовым потоком 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 в отсутствие спутного потока течение пленки является безволновым. Увеличение скорости спутного газового потока усиливает межфазное взаимодействие, что приводит к формированию двух- и трехмерных волн на поверхности пленки. Начиная с некоторых значений скорости и плотности газового потока (числа Вебера) имеют место отрыв капель с поверхности пленки и их унос спутным потоком [7].

В экспериментах, описываемых в данной работе, скорость спутного газового потока достигала звуковой (порядка 300 м/с), а давление в вакуумной камере, в которую истекала струя, могло понижаться до 1 Па. В этих условиях роль массовых сил пренебрежимо мала, а определяющее влияние на поведение пристенной пленки жидкости внутри сопла и в струе за ним оказывает спутный газовый поток. В работе [8] показано, что при истечении жидкости в вакуум пристенная пленка не только распадается на капли на выходной кромке сопла, но и выходит на его внешнюю поверхность, двигаясь по ней в направлении, противоположном направлению потока и сил тяжести. При истечении в атмосферу возвратное течение пленки отсутствует. Установлено, что при истечении в вакуум разворот пленки на выходной кромке сопла и ее выход на внешнюю поверхность происходит под действием спутного газового потока при его расширении в течении Прандтля — Майера [9]. В то же время остались неизученными процесс испарения вышедшей на внешнюю поверхность сопла пленки жидкости, ее взаимодействие со спутным газовым потоком внутри сопла, а также структура течения капельной фазы, возникающая за срезом сопла в вакууме. В данной работе приведены результаты экспериментального исследования этих процессов.

1. Экспериментальная установка и методы диагностики. Эксперименты проведены на вакуумном газодинамическом комплексе (крупномасштабная установка ВИКИНГ объемом приблизительно 150 м³) Института теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН [10]. Схема рабочего участка приведена на рис. 1.

Сопло (цилиндрическая трубка длиной 28 мм с внутренним диаметром 10 мм и толщиной стенки 1 мм) устанавливалось внутри вакуумной камеры вертикально, выходная часть сопла была направлена вниз. Рабочая жидкость подавалась в форкамеру сопла че-

Физические свойства рабочих жидкостей

Рабочая жидкость	p_n , кПа	$\eta \cdot 10^3$, Па·с	$\rho \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	$\sigma \cdot 10^3$, Н/м	T_3 , °С	T_k , °С	Q , кДж/кг
Этанол (C ₂ H ₆ O)	5,8660	1,190	0,79	22,8	-114,50	78,3	840
Вода (H ₂ O)	2,3388	1,002	1,00	72,8	0	100,0	2256
Додекан (C ₁₂ H ₂₆)	0,0097	1,492	0,75	25,5	-9,55	216,3	360

рез кольцевой зазор шириной 0,1 мм. Одновременно через сопло продувался рабочий газ, в качестве которого использовался воздух. Эксперименты проводились в импульсном режиме. Характерное время истечения составляло 5 с, при этом время установления процесса истечения составляло менее 1 с. Программа экспериментов включала два этапа: 1) исследование взаимодействия пристенной пленки жидкости со спутным газовым потоком внутри сопла; 2) исследование истечения пристенной пленки совместно с газовым потоком из сопла в вакуум. Для измерения локальных параметров пристенной пленки жидкости внутри сопла использовались пять коаксиальных датчиков емкостного типа, заделанных заподлицо с внутренней поверхностью сопла, при этом четыре датчика, расположенные вблизи выходного среза сопла с шагом, равным 90°, служили для измерения толщины пленки, и один датчик, расположенный выше по потоку, использовался для измерения скорости переднего фронта пристенной пленки и скорости волн на ее поверхности (см. рис. 1). Данный метод измерений параметров пристенной пленки не вносит возмущений в исследуемую область течения, обладает высоким временным (частота измерений каждым датчиком равна 1 кГц) и пространственным (внешний диаметр датчика равен 1,6 мм, внутренний — 0,5 мм) разрешением. Подробное описание методики измерений приведено в работе [11].

При проведении экспериментальных исследований важным является вопрос о достоверности результатов измерений, поэтому в данной работе большое внимание уделено тарировке емкостных датчиков. Обычно тарировка таких датчиков проводится в стационарных условиях, когда над поверхностью зонда создается пленка определенной толщины (которую можно измерить, например, контактным способом). Такой способ тарировки неприменим для криволинейных поверхностей, в частности для цилиндрического канала. Поэтому была реализована схема с использованием плотно вставляемых в канал втулок из диэлектрика, на которых над датчиком выполнялась проточка заданной глубины, заполняемая жидкостью. Этот способ позволил получить тарировочные кривые для каждого датчика с учетом его индивидуальной чувствительности и фактической заделки относительно поверхности канала.

На втором этапе экспериментов основное внимание уделялось исследованию процесса испарения пленок, формирующихся на внешней поверхности сопла. С использованием малогабаритного (2,8 × 1,2 × 1,0 мм) малоинерционного полупроводникового датчика температуры TI LM50, закрепленного на внешней поверхности сопла вблизи его среза, осуществлялась запись температуры во времени. Кроме того, проведены измерения пространственного распределения капельной фазы за срезом сопла путем осаждения на бумажные подложки, которые были закреплены по окружности на некотором расстоянии от среза сопла, при этом в рабочую жидкость добавлялось небольшое количество красителя, не сублимирующегося в вакууме.

В качестве рабочих жидкостей в экспериментах использовались этанол, вода и додекан, основные физические свойства которых приведены в таблице (p_n — давление насыщенных паров при $T = 20$ °С, η — динамическая вязкость при $T = 20$ °С, ρ — плотность при $T = 20$ °С, σ — коэффициент поверхностного натяжения при $T = 20$ °С, T_3 — темпе-

ратура замерзания при $p = 101$ кПа, T_k — температура кипения при $p = 101$ кПа, Q — теплота испарения при $p = 101$ кПа). Выбор этанола в качестве рабочей жидкости обусловлен тем, что он достаточно точно моделирует гептил, обычно используемый в виде пленки для охлаждения стенок сопла двигателей ориентации космических аппаратов и орбитальных станций. Вода также была выбрана вследствие того, что она имеет ряд приложений в космической технике (например, сброс отработанной воды с борта орбитальной станции). Выбор додекана в качестве рабочей жидкости обусловлен его физическими свойствами, а именно очень низким давлением насыщенных паров. Согласно данным, приведенным в таблице, давление насыщенных паров этанола и воды на несколько порядков больше рабочего давления в вакуумной камере, поэтому при попадании в вакуум эти жидкости становятся “мгновенно перегретыми” и взрывным образом распадаются на капли. Вследствие низкого давления насыщенных паров додекана он не должен испаряться и распадаться на капли при попадании в вакуум. Кроме того, другие физические свойства указанных жидкостей существенно различаются (температуры замерзания и кипения, удельная теплота испарения, коэффициент поверхностного натяжения). На первом этапе экспериментов (течение внутри сопла) использовался только этанол, поскольку при взаимодействии пристенной пленки жидкости со спутным газовым потоком внутри сопла важными являются такие свойства жидкости, как вязкость и поверхностное натяжение, которые у всех трех жидкостей достаточно близки. На втором этапе исследований (истечение пристенной пленки жидкости в вакуум) использовались все три жидкости (этанол, вода и додекан), так как в условиях вакуума важными становятся такие физические свойства жидкостей, как давление насыщенных паров и удельная теплота фазового перехода (испарения).

При проведении экспериментов начальное давление в вакуумной камере задавалось таким образом, чтобы обеспечивалась требуемая скорость истечения газового потока из сопла, при этом минимальное начальное давление в вакуумной камере составляло приблизительно 1 Па, давление газа в форкамере сопла изменялось в диапазоне от $1,1 \cdot 10^4$ до $1,2 \cdot 10^5$ Па (расход газа — от 2 до 22 г/с), расход рабочих жидкостей — от 0,4 до 1,0 г/с. Начальные температуры газа и жидкости были комнатными. Заметим также, что определяющими критериями подобия для рассматриваемой задачи являются числа Рейнольдса Re_g и Вебера We спутного газового потока, а также число Рейнольдса Re_l пристенной пленки жидкости.

2. Взаимодействие пристенной пленки этанола со спутным потоком воздуха внутри сопла. На рис. 2 приведены зависимости толщины пленки жидкости от времени при истечении в вакуум для различных значений числа Рейнольдса Re_g . Видно, что спутный газовый поток оказывает определяющее влияние на течение пленки: при изменении Re_g существенно меняются как толщина, так и характер течения пленки. Также видно, что пленка жидкости имеет четко выраженную волновую структуру с относительно большой частотой (десятки герц) и амплитудой волн, сравнимой по порядку величины с ее толщиной. Волны имеют крутой фронт, за которым следует пологая часть с движущимися по ней более мелкими волнами (рябь).

Проведенные эксперименты позволили получить количественные данные о средних толщинах пленок этанола в рассматриваемых условиях, а именно при изменении скорости спутного газового потока в диапазоне от 6 до 317 м/с (при изменении числа Маха M в диапазоне $0,02 \div 1,00$), и обобщить их (рис. 3,а). Из рис. 3,а следует, что в исследованном диапазоне режимных параметров средние толщины пленок определяются числом Рейнольдса спутного газового потока Re_g . На рис. 3,б приведена зависимость амплитуды волн на поверхности пленки жидкости от числа Рейнольдса Re_g . На рис. 3 видно, что с увеличением Re_g средняя толщина и амплитуда волн на поверхности пленки уменьшаются.

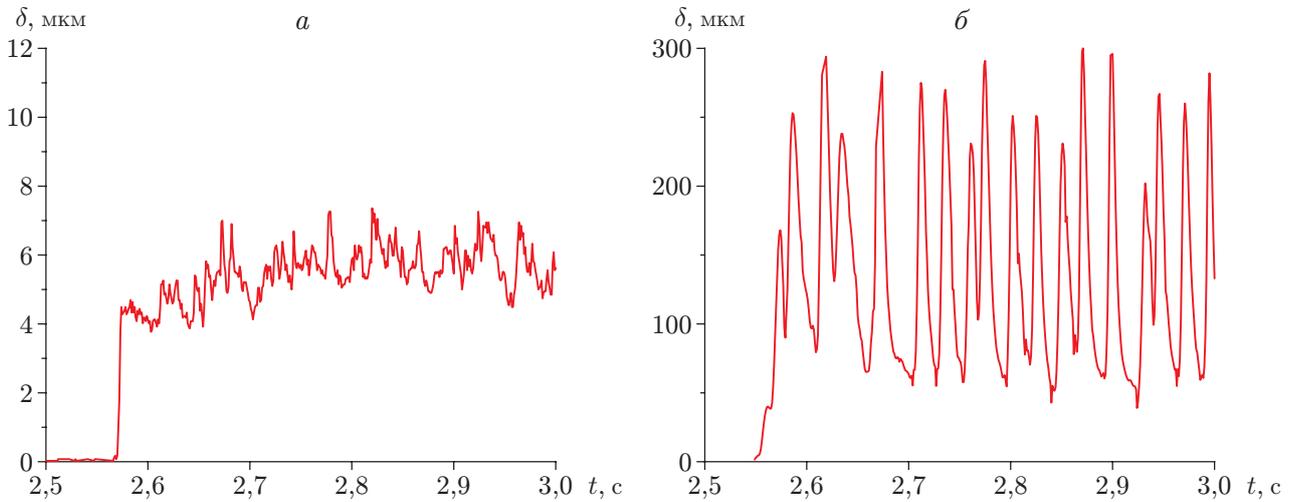


Рис. 2. Зависимости толщины пристенной пленки этанола δ от времени t при различных значениях числа Рейнольдса Re_g :
 а — $Re_g = 1,5 \cdot 10^5$, б — $Re_g = 6,9 \cdot 10^3$

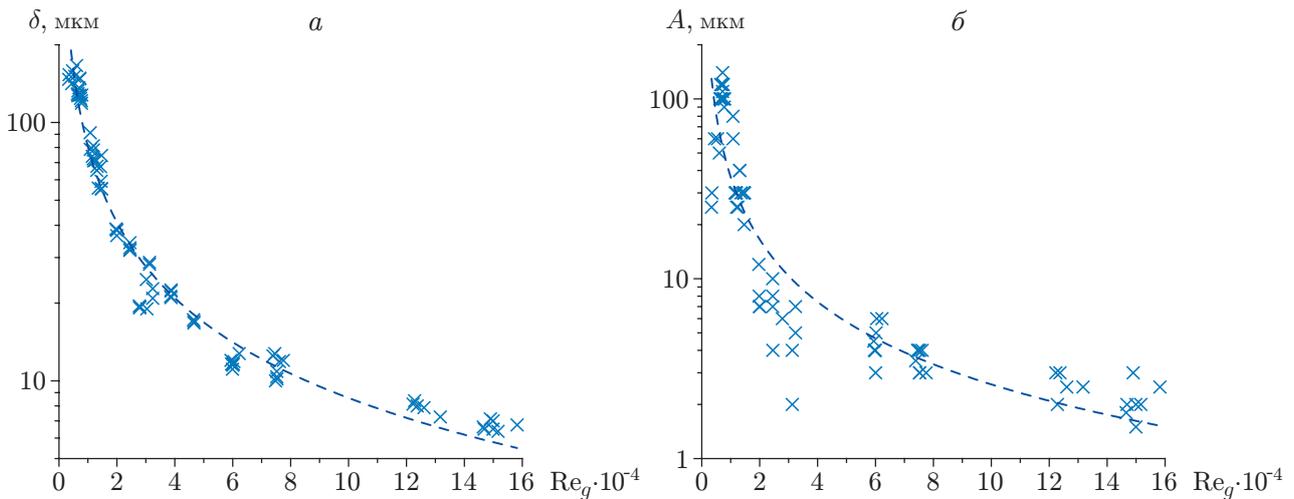


Рис. 3. Зависимости средней толщины пленки δ (а) и амплитуды волн на поверхности пленки A (б) от числа Рейнольдса Re_g при $Re_l = 9$:
 точки — экспериментальные данные, линии — результаты аппроксимации

Помимо данных о толщинах и амплитудах волн проведенные исследования позволили получить также частотные характеристики пленок этанола. На рис. 4 приведены экспериментальные зависимости частоты мелких волн (ряби) и крупных волн, регистрируемых на поверхности пленки, от Re_g . Видно, что с увеличением числа Рейнольдса спутного газового потока частота как мелких, так и крупных волн увеличивается. При этом рябь на поверхности пленки наблюдается начиная с минимальных реализованных в эксперименте чисел Рейнольдса газа $Re_g = 3 \cdot 10^3$. Максимальное значение числа Рейнольдса газа, при котором наблюдается рябь, равно $3,3 \cdot 10^4$. Можно предположить, что мелкие волны на поверхности пленки имеют место и при бóльших значениях Re_g , однако, поскольку частота регистрации данных емкостными датчиками в экспериментах составляла 1 кГц, мелкие волны с частотой более $300 \div 320$ Гц на диаграммах толщины пленки становят-

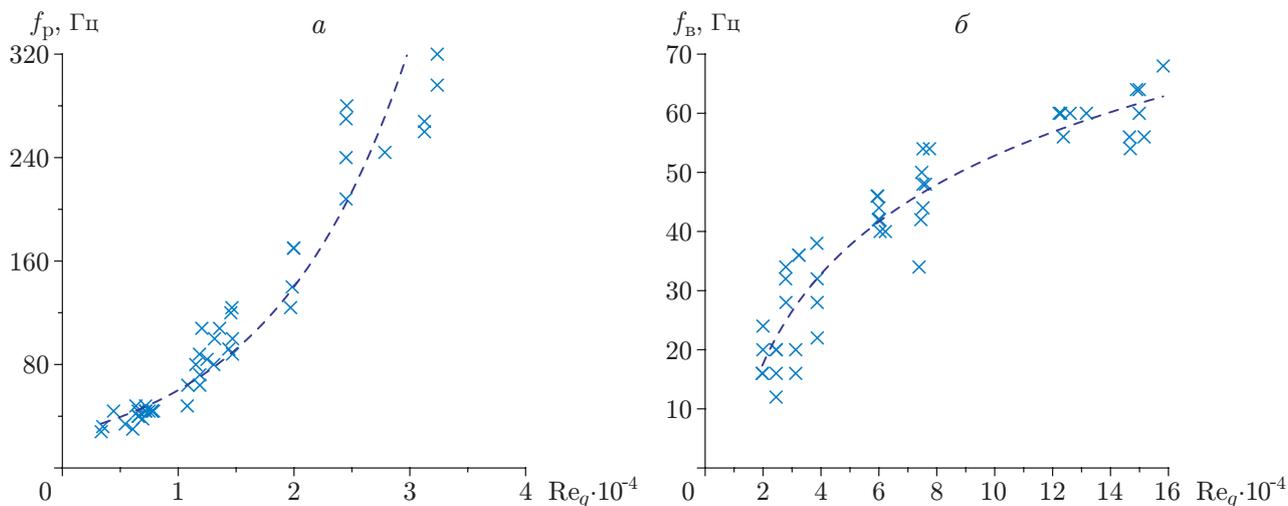


Рис. 4. Зависимости частоты мелких волн (ряби) f_p (а) и крупных волн f_B (б) на поверхности пленки от числа Рейнольдса Re_g при $Re_l = 9$: точки — экспериментальные данные, линии — результаты аппроксимации

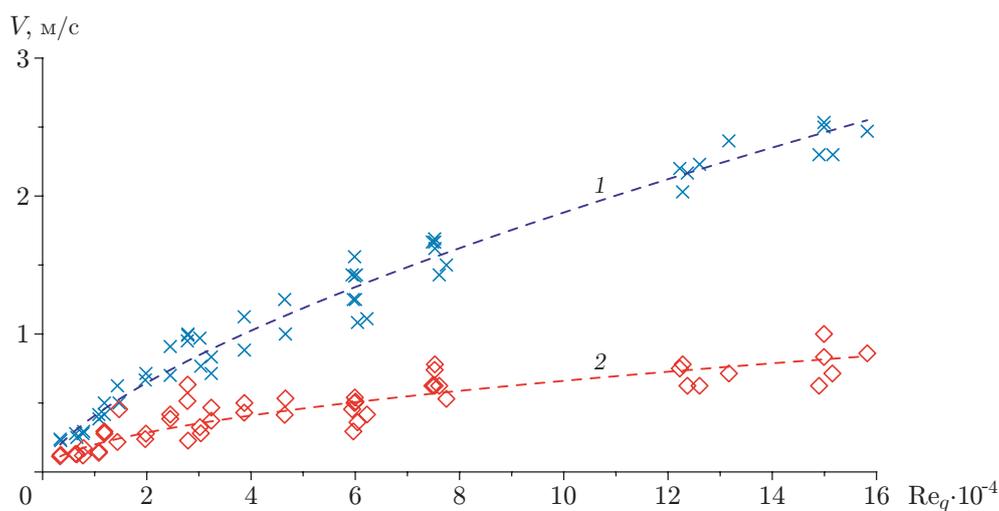


Рис. 5. Зависимость скорости движения пленки этанола V от числа Рейнольдса Re_g при $Re_l = 9$: точки — экспериментальные данные, линии — результаты аппроксимации; 1 — скорость крупных волн, 2 — скорость переднего фронта пленки

ся неразличимы. Крупные волны на поверхности пленки регистрируются при значениях числа Рейнольдса начиная с $Re_g = 2 \cdot 10^3$ и имеют место при всех значениях $Re_g > 2 \cdot 10^3$ вплоть до максимального значения числа Рейнольдса газа, реализованного в эксперименте ($Re_g = 1,6 \cdot 10^5$).

Измерения, проведенные двумя последовательно расположенными датчиками, позволили также получить экспериментальные данные о скоростях движения переднего фронта пристенных пленок и скоростях волн на межфазной поверхности. На рис. 5 приведена зависимость скорости пленки этанола от числа Рейнольдса Re_g . Несмотря на то что наблюдается некоторый разброс экспериментальных данных, в целом они коррелируют с числом Рейнольдса Re_g . Поскольку измеренные значения средней толщины и скорости

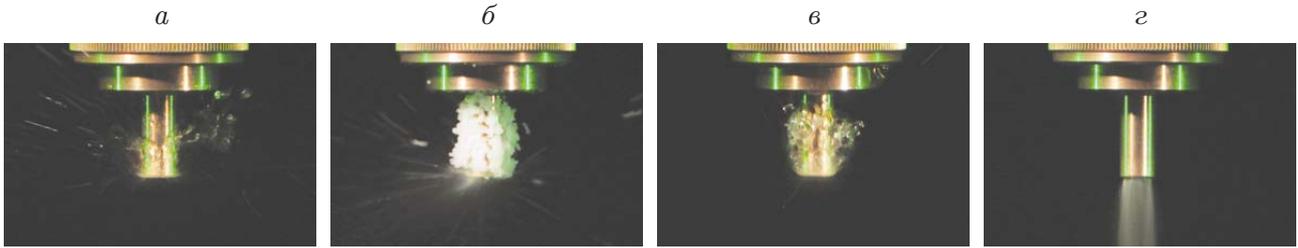


Рис. 6. Истечение пленки жидкости из цилиндрического канала:

a — этанол ($p_k = 1$ Па), *б* — вода ($p_k = 1$ Па), *в* — додекан ($p_k = 1$ Па), *г* — этанол ($p_k = 100$ кПа)

пленки позволяют определить расход жидкости в выходном сечении сопла, а начальный расход жидкости известен, можно определить количество жидкости, которая срывается с поверхности пленки и уносится спутным газовым потоком внутри сопла. Установлено, что до 50 % расходуемой жидкости уносится спутным потоком газа в виде капель, при этом количество уносимой жидкости определяется числом Вебера We .

3. Истечение пристенной пленки жидкости со спутным газовым потоком из сопла в вакуум. На рис. 6, *a–в* приведены полученные в работе [9] фотографии процесса истечения пленок этанола, воды и додекана в вакуумную камеру при давлении в ней $p_k \approx 1$ Па. Для сравнения на рис. 6, *г* показано истечение пристенной пленки этанола в атмосферу. Видно, что процессы истечения пристенных пленок жидкости в вакуум и атмосферу существенно различаются. При истечении в атмосферу имеет место обычная газочапельная струя, в то время как при истечении в вакуум пристенная пленка выходит на внешнюю поверхность сопла и поднимается вверх. Видно также, что при истечении в вакуум пленки воды на внешней поверхности формируется слой льда. Это обусловлено физическими свойствами воды — удельной теплотой испарения и температурой замерзания.

В экспериментах проводилось измерение температуры пристенной пленки на внешней поверхности сопла. Результаты измерений температуры пленок жидкостей, вышедших на внешнюю поверхность сопла, приведены на рис. 7. Полученный результат можно объяснить, если допустить, что пленка этанола охлаждается до температуры, при которой давление его насыщенных паров близко к давлению в вакуумной камере. Иными словами, чем ниже давление в вакуумной камере, тем меньше температура, до которой охлаждается пленка жидкости. Что касается истечения пленки додекана, то поскольку давление его насыщенных паров очень низкое (см. таблицу), процесс испарения, а следовательно, и охлаждения происходит медленно (см. рис. 7), при этом конечная температура пленки составляет приблизительно 17 °С. В случае воды пленка при истечении в вакуум замерзает, охлаждаясь до температуры, приблизительно равной $-5,5$ °С (см. рис. 6, *б*), что не противоречит приведенным выше рассуждениям.

Результаты измерений распределения капельной фазы в газочапельном потоке за срезом сопла (рис. 8) показывают, что существует две характерные области течения: центральная и периферийная — с существенно различными условиями их возникновения и локальными характеристиками капель в них. Основным механизмом формирования центральной области струи является срыв капель жидкости с поверхности пленки несущим газовым потоком с их последующим дроблением и ускорением. Центральная область газочапельной струи ограничивается углом $\varphi = 30^\circ$ относительно оси струи и состоит из капель размером порядка 1 мкм со скоростями порядка 100 м/с. Основным механизмом формирования периферийной области струи (углы $\varphi = 45 \div 180^\circ$ относительно оси струи)

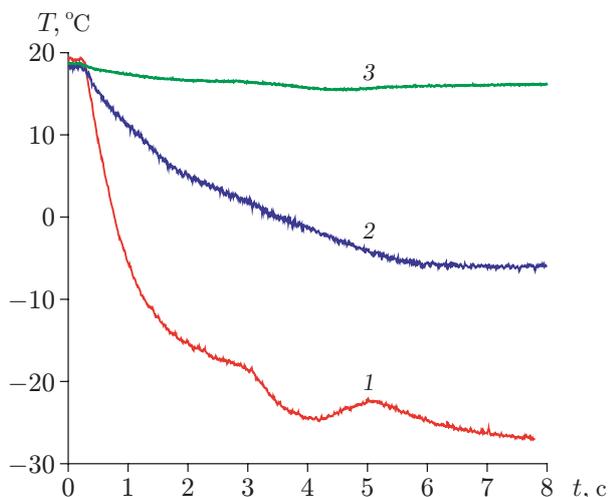


Рис. 7

Рис. 7. Зависимость температуры пленки от времени:

1 — этанол, 2 — вода, 3 — додекан

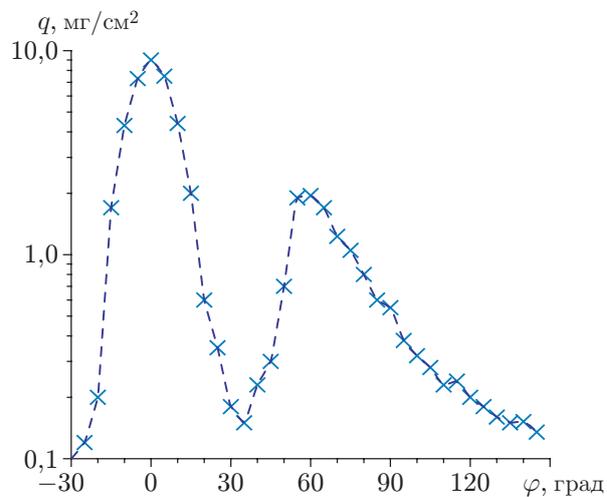


Рис. 8

Рис. 8. Распределение капельной фазы в газокapelном потоке за срезом сопла:

точки — экспериментальные данные, линии — результаты аппроксимации

является частичное диспергирование на капли пленки жидкости на выходной кромке сопла и на его внешней поверхности под действием как несущего газового потока, так и фазового взрыва. На рис. 8 видны также обратные потоки (при $\varphi > 90^\circ$) капельной фазы. Такие потоки являются основной причиной загрязнения внешних поверхностей космических аппаратов.

Заключение. В работе экспериментально исследовано истечение пристенных пленок этанола, воды и додекана со спутным потоком воздуха из сопла в виде цилиндрической трубки в вакуум. Измерены локальные параметры пленок жидкостей внутри сопла. Установлено, что в условиях проведенных экспериментов спутный поток газа оказывает существенное влияние на пристенную пленку, вызывая интенсивное волнообразование, срыв и унос капель с межфазной поверхности. Расход уносимой в виде капель жидкости коррелирует с числом Вебера и может достигать 50 % начального расхода. Показано, что при истечении в вакуум пристенная пленка жидкости на выходной кромке сопла разворачивается под действием спутного газового потока и выходит на внешнюю поверхность сопла. Затем пленка испаряется, охлаждаясь до температуры, при которой давление насыщенных паров становится равным давлению в вакуумной камере. Исследована структура газокapelного потока за срезом сопла в вакууме. Установлено наличие двух характерных зон течения капельной фазы: центральной, формирующейся в результате срыва и уноса капель с поверхности пленки внутри сопла, их последующего дробления и ускорения несущим газовым потоком, и периферийной, формирующейся в результате диспергирования пленки жидкости на кромке сопла.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rebrov A. K.** Free jets in vacuum technologies // J. Vacuum Sci. Technol. Ser. A. 2001. V. 19. P. 1679–1687.
2. **Капица П. Л.** Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1948. Т. 18, № 1. С. 3–28.

3. **Капица П. Л., Капица С. П.** Волновое течение тонких слоев вязкой жидкости. Опытное изучение волнового режима течения // Журн. эксперим. и теорет. физики. 1949. Т. 19, № 2. С. 106–120.
4. **Алексеев С. В.** Волновое течение пленок жидкости / С. В. Алексеев, В. Е. Накоряков, Б. Г. Покусаев. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 1992.
5. **Chang H.-C.** Complex wave dynamics on thin films / H.-C. Chang, E. A. Demekhin. Amsterdam: Elsevier, 2002.
6. **Kalliadasis S.** Falling liquid films / S. Kalliadasis, C. Ruyer-Quil, B. Scheid, M. G. Velarde. L.: Springer, 2012.
7. **Гогонин И. И.** Теплообмен при конденсации движущегося пара внутри вертикальных труб (обзор) // Инж.-физ. журн. 2004. Т. 77, № 2. С. 167–180.
8. **Приходько В. Г., Чекмарев 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 // Докл. АН. 2004. Т. 394, № 5. С. 618–620.
9. **Yarygin V. N., Prikhodko V. G., Yarygin I. V., Vyazov Yu. N.** Near-wall liquid film ejection with co-current gas flow from nozzle into vacuum // Vacuum. 2014. V. 109. P. 401–404.
10. **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.
11. **Серов А. Ф., Кротов С. В., Назаров А. Д. и др.** Емкостный измеритель локальной толщины пленки жидкости // Приборы и техника эксперимента. 1997. Т. 40, № 1. С. 136–139.

Поступила в редакцию 25/VI 2018 г.
