

*Тринадцатая Международная научно-техническая конференция  
«Оптические методы исследования потоков»  
Москва, 29 июня — 03 июля 2013 г.*

УДК 532.529

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

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе  
Сибирского отделения Российской академии наук, Россия,  
630090, Новосибирск, просп. Акад. Лаврентьева, 1, E-mail: yarygin@itp.nsc.ru*

**ИСТЕЧЕНИЯ В ВАКУУМ ПРИСТЕННЫХ ПЛЕНОК  
ПЕРЕГРЕТЫХ ЖИДКОСТЕЙ**

**АННОТАЦИЯ**

В работе экспериментально исследуется обнаруженный авторами ранее эффект подъема пристенной пленки жидкости по наружной поверхности сопла против сил тяжести при совместном истечении с газом в вакуум. Установлено, что определяющее влияние на поведение пристенной пленки на выходной кромке сопла оказывают спутный поток газа, давление в окружающем пространстве (в вакуумной камере) и физические свойства жидкости (в первую очередь давление насыщенных паров и теплота испарения). Получены количественные данные по высоте подъема пленки для разных жидкостей и разных условий истечения. Обсуждаются причины подъема пленки по внешней поверхности сопла против сил тяжести.

**ВАКУУМ, ПЛЕНКА ЖИДКОСТИ, ПЕРЕГРЕТАЯ ЖИДКОСТЬ, ГАЗОКАПЕЛЬНЫЙ ПОТОК**

**ВВЕДЕНИЕ**

Истечение жидкостей и газожидкостных смесей в вакуум представляет как фундаментальный, так и практический интерес. В фундаментальном плане представляют интерес исследования физических процессов и явлений, сопровождающих истечение жидкости в вакуум – мгновенное вскипание, распад на капли, фазовые переходы на поверхности и внутри капель, взаимодействие капель со сверхзвуковым газовым потоком и т.д. Для практических приложений истечение жидкости в вакуум представляет интерес, в частности, для космической техники с точки зрения загрязнения поверхностей космических аппаратов при работе дренажных устройств, двигателей управления и ориентации, систем дозаправки и т.д.

Несмотря на то, что струйное истечение газа в вакуум было предметом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований, задача совместного истечения газового потока с пристенной пленкой жидкости до сих пор практически не исследована.

Одной из особенностей рассматриваемой задачи о газокапельном потоке, возникающем при совместном истечении газа и пленки жидкости в вакуум, является переход от сплошного течения внутри сопла и в его окрестностях к свободно-молекулярному в дальнем поле течения. Другая особенность состоит в том, что при попадании в вакуум жидкость

становится мгновенно «перегретой», что приводит к взрывообразному распаду жидкости на капли.

Наши ранние работы [1] были посвящены решению проблемы внешнего загрязнения космических аппаратов (включая МКС) струями двигателей ориентации, в которых топливная пленка используется для охлаждения стенок сопла. В качестве рабочей жидкости в этих экспериментах использовался этанол, который по основным физическим свойствам (плотность, давление насыщенных паров, удельная теплота парообразования, вязкость, коэффициент поверхностного натяжения) близок к несимметричному диметилгидразину, используемому в настоящее время в качестве топлива в двигателях ориентации МКС. Было обнаружено [2], что при истечении в вакуум пристенная пленки жидкости, двигаясь вниз по внутренней поверхности сопла, на выходной кромке не только распадается на капли, но также выходит на наружную поверхность сопла и начинает двигаться по ней, даже против силы тяжести. Такое поведение пленки жидкости и является основной причиной загрязнения внешних поверхностей космических аппаратов.

В тоже время, следует отметить, что обнаруженный эффект подъема пленки жидкости по наружной поверхности сопла представляет самостоятельный научный интерес как новое физическое явление. Данная работа посвящена экспериментальному исследованию указанного эффекта для жидкостей, существенно отличающихся по своим физическим свойствам от этанола.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ

Эксперименты были проведены на вакуумной газодинамической установке ВИКИНГ Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН [3]. Большой объем рабочей камеры (около  $150 \text{ м}^3$ ) обеспечивает широкие возможности для работы в импульсных режимах с большими расходами газа и жидкости. При этом вся инжектируемая жидкость полностью испаряется и откачивается вакуумными насосами.

Сопло (цилиндрическая трубка диаметром 5 мм и длиной 20 мм со стенками толщиной 1 мм) было установлено внутри вакуумной камеры вертикально, выходная часть сопла была направлена вниз. Рабочая жидкость попадала в форкамеру сопла через кольцевой зазор шириной 0.1 мм и далее стекала вниз по стенке в виде пленки. Одновременно через сопло продувался рабочий газ. В качестве рабочего газа использовался воздух, в качестве рабочих жидкостей – этанол, додекан, фреон-11 и вода. Их свойства приведены в таблице.

Таблица 1. Физические свойства рабочих жидкостей

Параметр	Ед.изм.	Этанол $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	Додекан $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$	Фреон-11 $\text{CCl}_3\text{F}$	Вода $\text{H}_2\text{O}$
Давление насыщ. паров при $T = 20^\circ\text{C}$	кПа	5.86	0.0097	88.92	2.31
Динамическая вязкость при $T = 20^\circ\text{C}$	Па·с, $10^{-3}$	1.2	1.492	0.44	1.002
Плотность при $T = 20^\circ\text{C}$	кг/м <sup>3</sup>	0.79	0.75	1.49	1
Коэффициент поперх. натяжения $T = 20^\circ\text{C}$	Н/м, $10^{-3}$	22.8	25.5	18.6	72.8
Температура плавления при $p = 100 \text{ кПа}$	$^\circ\text{C}$	-114.5	-9.55	-110.5	0
Температура кипения при $p = 100 \text{ кПа}$	$^\circ\text{C}$	78.3	216.3	23.8	100
Теплота фазового перехода при $p = 100 \text{ кПа}$	кДж/кг	840	360	184	2256

Характерные условия экспериментов были следующие. Вакуумная камера откачивалась до давления около 1 Па. Давление газа в форкамере сопла в экспериментах с додеканом, этанолом и водой составляло около  $8 \cdot 10^4$  Па (расход газа около 3.8 г/с), в экспериментах с фреоном для исключения процесса кипения жидкости внутри сопла – около  $1,7 \cdot 10^5$  Па (расход газа около 8 г/с). Объемный расход рабочих жидкостей составлял около 0,4 мл/с, массовый расход жидкости зависел от плотности жидкости и составлял от 0.3 г/с для додекана до 0.6 г/с для фреона. Начальные температуры газа и жидкости были

одинаковыми и равнялись 293 К. Эксперименты проводились в импульсном режиме. Характерное время истечения составляло 5 с, при этом время установления процесса истечения составляло менее 1 с, а повышение давления в вакуумной камере – около 10 Па. Во время экспериментов проводилась фотосъемка процесса истечения через иллюминатор вакуумной камеры.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 1(*a-d*) приведены фотографии процесса истечения пристенных пленок этанола, додекана, фреона и воды в вакуумную камеру при начальном давлении в ней около 1 Па, на рис. 2 – истечение в камеру с атмосферным давлением на примере фреона (картина истечения в атмосферу этанола, додекана и воды качественно такая же).

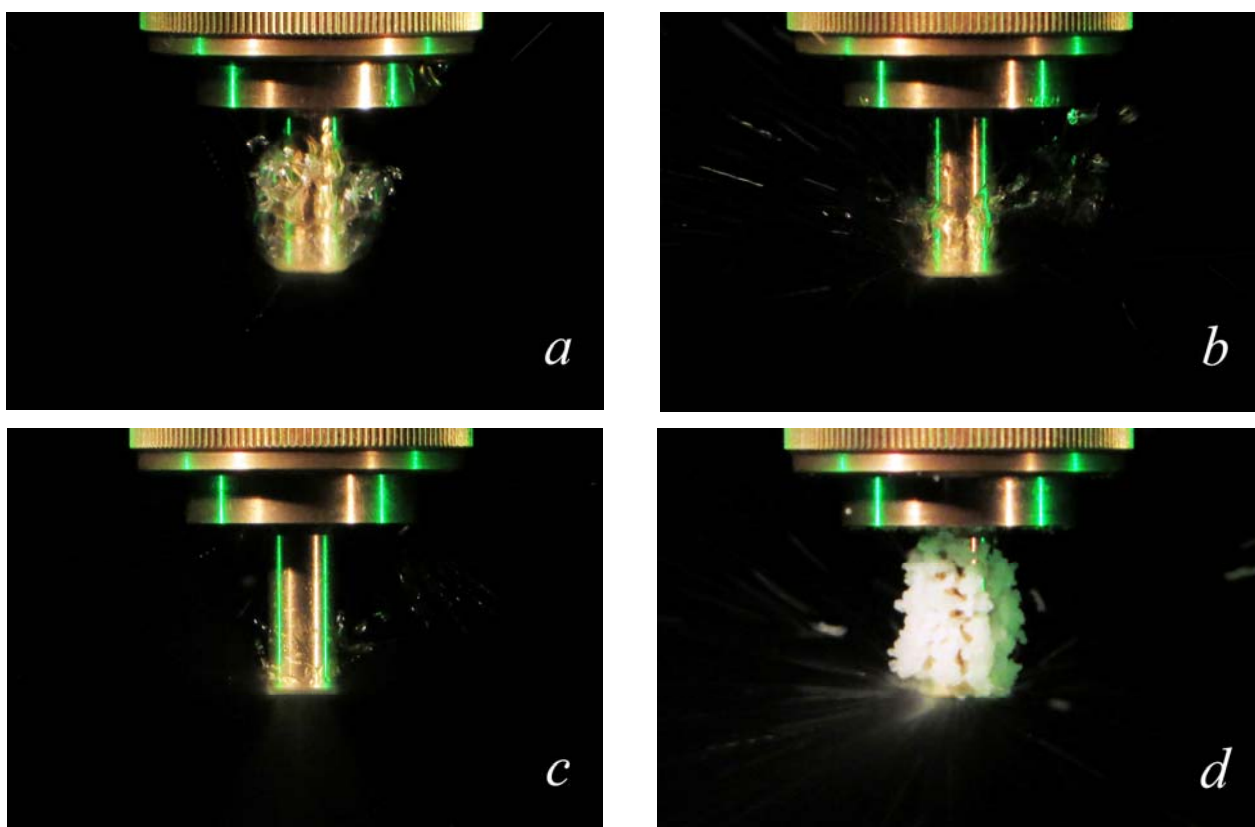


Рис. 1. Истечение жидкости в вакуум. *a* – додекан, *b* – этанол, *c* – фреон-11, *d* - вода

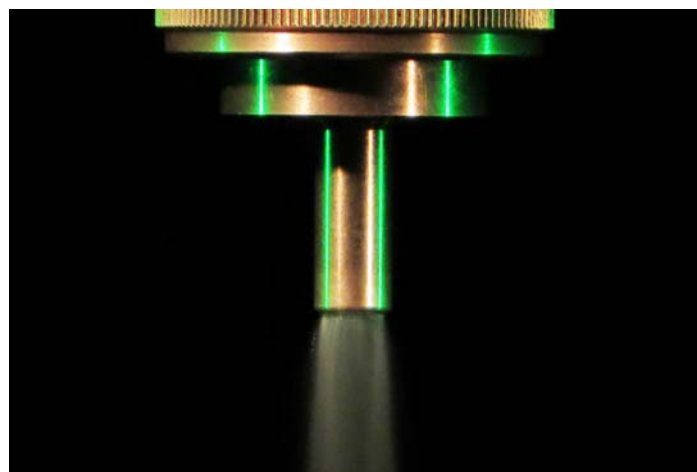


Рис. 2. Истечение жидкости в атмосферу. Фреон-11.

Видно, что истечение пристенных пленок для всех жидкостей в вакуум и в атмосферу существенно различается. При истечении в атмосферу имеет место обычная газокпельная струя, в то время как при истечении в вакуум пленка жидкости выходит на внешнюю поверхность сопла (цилиндрической трубки) и поднимается вверх даже против сил тяжести. Фото, показанные на рисунке, сделаны в момент, когда высота подъема пленки максимальна. Видно также, что при истечении в вакуум пленки воды на наружной поверхности формируется слой льда. Рис. 3 показывает как меняется высота подъема пленок от давления в вакуумной камере. Рассмотрим полученные результаты более подробно.

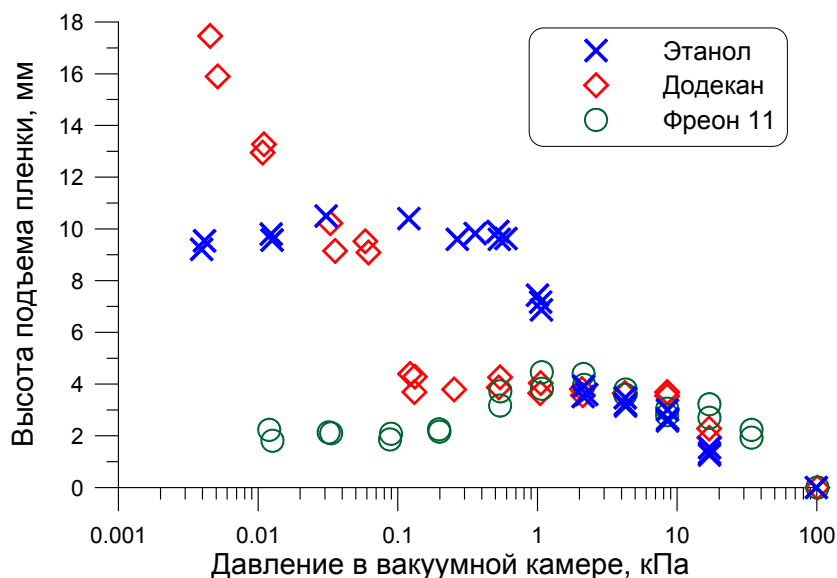


Рис. 3. Высота подъема пленки жидкости

**Додекан.** Как видно из приведенных фотографий и данных на рис. 2 у него высота подъема пленки наибольшая по сравнению с этанолом и фреоном. Додекан относительно этанола и фреона обладает наименьшим давлением насыщенных паров (см. таблицу). Хотя давление насыщенных паров додекана при комнатной температуре (9.7 Па) примерно на порядок превышает начальное давление в вакуумной камере (1 Па) это не приводит к взрывообразному распаду пленки на капли. По-видимому, это связано с тем, что при движении пристенной пленки додекана со спутным потоком воздуха внутри сопла пленка несколько охлаждается из-за понижения температуры газа при его ускорении до скорости звука. При этом снижается и величина давления насыщенных паров жидкости.

**Этанол.** У этанола давление насыщенных паров существенно, более чем на два порядка, превышает давление насыщенных паров додекана. Поэтому при истечении в вакуумную камеру с давлением около 1 Па пленка этанола становится «перегретой» даже при комнатной температуре. Это приводит к частичному диспергированию пленки на капли при её подъеме по наружной поверхности сопла. Этот эффект можно видеть на рис. 1b.

**Фреон-11.** У фреона давление насыщенных паров близко к атмосферному, поэтому эффект диспергирования (фазовый взрыв) наиболее выражен. Из рис. 1c видно, что пленка фреона распадается на капли вблизи выходного сечения сопла и почти не поднимается вверх.

**Вода.** Часть экспериментов была проведена с водой, как рабочим телом, из-за ряда прикладных приложений. В настоящее время в литературе имеются публикации по истечению воды в вакуум, и практически все они связаны с космическими приложениями и посвящены сбросу воды с орбитальных станций через трубки разного диаметра. В этих работах показано, что при истечении в вакуум струя воды распадается на капли, которые быстро замерзают вследствие охлаждения из-за большой величины теплоты испарения воды. В то же время мы не нашли публикаций по исследованию истечения воды в вакуум в виде пристенной пленки со спутным потоком газа. Полученные результаты (рис. 1d), а именно

превращение пленки воды в лед или снег при истечении в вакуум было вполне ожидаемым. Однако её подъем на всю высоту трубки не был предсказуемым.

Что касается влияния окружающего давления (давления в вакуумной камере) на подъем пленки жидкости, то как следует из рис. 3, этот эффект в условиях проведенных экспериментов становится практически не существенным при давлениях в камере более 10 кПа. При этом для жидкостей, обладающих низким давлением насыщенных паров эффект является определяющим в области низких давлений (менее 10 кПа) в окружающем пространстве. В то же время видно, что характер изменения высоты подъема пленки от давления в вакуумной камере для разных жидкостей различен.

Первый вопрос, который следует обсудить – какие силы в рассматриваемых условиях вынуждают пристенную пленку жидкости развернуться на  $180^\circ$  на выходной кромке и выйти на наружную поверхность сопла? Второй вопрос – какие силы заставляют пленку жидкости двигаться вверх по наружной поверхности сопла даже против сил тяжести? Ответ на эти вопросы частично содержится в нашей ранней публикации [2], где было сделано предположение, что разворот пленки обусловлен силами адгезии и, возможно, эффектом Коанда, а подъем пленки – её взаимодействием в газовым потоком. Однако более детальный анализ и проведенные оценки показывают, что это не совсем так. Действительно, в условиях проведенных экспериментов пристенная пленка жидкости внутри сопла движется под действием сил тяжести и газового потока (касательного напряжения на границе раздела фаз). При этом воздействие газового потока на пленку (её толщину и скорость) является определяющим. Известно, что при расширении газа из сопла в вакуум возникает течение Прандтля-Майера, в котором газовый поток разворачивается на угол более  $90^\circ$  относительно оси струи. Предельный угол разворота  $\theta_{\max}$  зависит от числа Маха  $M_a$  и отношения удельных теплоемкостей  $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$  и для нашего случая ( $M_a = 1$ ,  $\gamma = 1.4$ ) составляет  $\theta_{\max} = 130^\circ$ ,

то есть возникают обратные потоки газа. По-видимому, этот разворачивающийся газовый поток удерживает пленку на выходной кромке сопла и заставляет её выходить на наружную поверхность сопла. В то же время, вследствие сильного (на порядки) падения плотности газа при расширении в вакуум величина касательного напряжения  $\tau = \frac{C_f}{2} \rho V^2$  (где  $C_f$  –

коэффициент сопротивления,  $\rho$  – плотность газа,  $V$  – скорость газа) также сильно, на порядки, уменьшается, и воздействие газового потока на пленку практически прекращается. Поэтому подъем пленки за счет взаимодействия с газовым потоком маловероятен.

Можно предположить, что подъем пленки обусловлен инерционными силами пленки жидкости. Тогда из уравнения сохранения энергии можно оценить максимальную высоту подъема пленки жидкости:  $h = V_l^2/2g$ , где  $V_l$  – плотность и скорость жидкости,  $g$  – ускорение свободного падения. Для оценки средней скорости пристенной пленки в выходном сечении сопла можно воспользоваться моделью взаимодействия спутного газового потока с пристенной пленкой жидкости при движении внутри сопла [4]. Расчеты по этой модели для наших условий дают величину скорости  $V_l = 0.95$  м/с для этанола и  $V_l = 0.9$  м/с для додекана. Тогда максимальная высота подъема пленки на наружной поверхности  $h_{\max} = 45$  мм, что примерно в 2.5 раза больше экспериментальных значений (18 мм, рис. 3). В то же время истинная скорость движения пленки после её выхода на наружную поверхность сопла и скорость подъема неизвестны. Можно ожидать, что из-за сопротивления при движении вверх по стенке она должна быть меньше расчетной. Поэтому предложенный механизм подъема пленки на данном этапе исследований кажется правдоподобным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнен цикл экспериментов по исследованию эффекта подъема пристенных пленок различных жидкостей по наружной поверхности цилиндрического сопла при совместном истечении с газом в вакуум. Показано, что при истечении в вакуум разворот пленки на

выходной кромке сопла и её выход на наружную поверхность происходит под действием спутного газового потока при его развороте в течении Прандтля-Майера. Дальнейший подъем пленки по наружной поверхности сопла, по-видимому, обусловлен силами инерции пленки жидкости. При этом для жидкостей с высоким давлением насыщенных паров пленка жидкости на наружной поверхности сопла взрывообразно разрушается на капли, практически не поднимаясь вверх. Для жидкостей с низким давлением насыщенных паров эффект взрывообразного распада пленки на капли несущественен и для них высота подъема пленки значительно выше. Эта высота определяющим образом зависит от давления в окружающем пространстве (в вакуумной камере).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Prikhodko V.G., Chekmarev S.F., Yarygin V.N. and Yarygin I.V. Rise of a Near-Wall Liquid Film over the Outer Surface of a Nozzle Accompanying Supersonic Gas Flow into Vacuum // Doklady physics. 2004. Vol.49, No.2, pp. 119-121.
3. Prikhodko V.G., Khramov G.A., and Yarygin V.N. A large-scale cryogenic vacuum plant for gas-dynamics research // Instruments and Experimental Techniques. 1996. Vol. 39, No. 2. pp. 309-311.
4. Yarygin I.V. and 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 Int. Conf. on the Methods of Aerophysical Research ICMAR'2004, Part 4, pp. 310-314.

V.N. Yarygin, V.G. Prikhodko, I.V. Yarygin

*Kutateladze Institute of Thermophysics,  
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia,  
630090, Novosibirsk, Lavrentiev ave., 1, E-mail: yarygin@itp.nsc.ru*

## EJECTION OF SUPERHEATED LIQUID WALL FILMS INTO VACUUM

*Recently discovered phenomenon of near-wall liquid film rise against gravity on an external surface of a nozzle under joint ejection with co-current gas flow into vacuum is studied experimentally for a variety of liquids and ejection regimes. It is shown that co-current gas flow parameters, pressure in surrounding space (in vacuum chamber) and physical properties of liquid (primarily saturated vapor pressure and heat of evaporation) have the main influence on behavior of a near-wall film at the exit edge of the nozzle. Quantitative data on height of liquid film rise for different liquids and different conditions of ejection are obtained. Possible theories that account for the film rise against gravity on the external surface of the nozzle are discussed.*

VACUUM, LIQUID FILM, SUPERHEATED LIQUID, GAS-DROPLET FLOW