

УДК 532.529

**О влиянии физических свойств жидкости
на истечение пристенной пленки
со спутным газовым потоком из сопла в вакуум**

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

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

E-mail: yarygin@itp.nsc.ru

В работе экспериментально установлено определяющее влияние физических свойств жидкости (давления насыщенных паров и теплоты испарения) и величины давления в вакуумной камере на поведение пристенной пленки жидкости при истечении в вакуум, характеризующееся высотой подъема, распадом на капли, охлаждением вплоть до замерзания.

Ключевые слова: пристенная пленка жидкости, спутный газовый поток, сопло, истечение в вакуум.

Истечение газа в вакуум являлось предметом многочисленных экспериментальных и теоретических исследований, однако задача совместного истечения газового потока с пристенной пленкой жидкости до сих пор недостаточно изучена.

Ранние работы авторов (см., например, [1]) были посвящены решению проблемы внешнего загрязнения Международной космической станции (МКС) струями двигателей ориентации, в которых топливная пленка используется для охлаждения стенок сопла. Было обнаружено [2], что при истечении в вакуум пристенная пленка жидкости на выходной кромке не только распадается на капли, но также выходит на наружную поверхность сопла и начинает двигаться в обратном направлении, даже против силы тяжести. Позднее было экспериментально показано [3], что разворот пленки на выходной кромке сопла и ее выход на наружную поверхность происходит под действием спутного газового потока при его развороте в течения Прандтля–Майера, а дальнейший подъем пленки обусловлен силами инерции. В качестве рабочей жидкости использовался этанол, который по основным физическим свойствам (плотность, давление насыщенных паров, удельная теплота парообразования, вязкость, коэффициент поверхностного натяжения) близок к несимметричному диметилгидразину (гептилу), используемому в настоящее время в качестве топлива в двигателях ориентации МКС. Отметим, что обнаруженный эффект подъема пленки жидкости по наружной поверхности сопла представляет самостоятельный научный интерес как новое физическое явление. Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию указанного эффекта для жидкостей, существенно

отличающихся по своим физическим свойствам от этанола. В качестве таких жидкостей использовались фреон-11 и вода. Фреон-11 был выбран из-за высокого давления насыщенных паров, а вода — из-за большой удельной теплоты испарения.

Эксперименты проводились на крупномасштабной (объемом около 150 м^3) вакуумной газодинамической установке «ВИКИНГ» Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН [4]. Сопло (цилиндрическая трубка внутренним диаметром 5 мм и длиной 20 мм с толщиной стенки 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. Одновременно через сопло продувался рабочий газ, в качестве которого использовался воздух. Характерные условия экспериментов были следующие: минимальное давление в вакуумной камере составляло около 1 Па, давление газа в форкамере сопла в экспериментах с этанолом и водой составляло около $8 \cdot 10^4$ Па (расход газа $\approx 3,8$ г/с), в экспериментах с фреоном для исключения процесса кипения жидкости внутри сопла давление составляло около $1,7 \cdot 10^5$ Па (расход газа ≈ 8 г/с). Объемный расход рабочих жидкостей составлял около 0,4 мл/с. Эксперименты проводились в импульсном режиме. Характерное время истечения равнялось 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, а также измерялась температура пленки на наружной поверхности сопла вблизи выходной кромки с помощью малоинерционных полупроводниковых датчиков Texas Instruments LM50.

На рис. 1а–1с приведены фотографии процесса истечения пристенных пленок этанола, фреона и воды в вакуумную камеру при начальном давлении в ней около 1 Па, на рис. 1д показано истечение в камеру с атмосферным давлением на примере фреона (картина истечения в атмосферу этанола и воды качественно такая же). Можно видеть, что поведение пристенных пленок фреона и воды отличается от поведения пленки этанола. Для фреона-11, у которого давление насыщенных паров близко к атмосферному, пленка почти не поднимается вверх, а диспергируется на капли вблизи выходной кромки сопла,

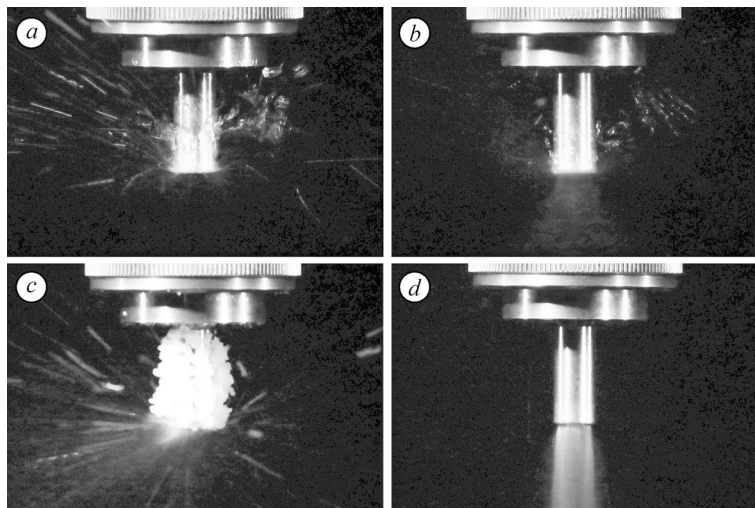


Рис. 1. Истечение пленки жидкости.

а — этанол, б — фреон-11, в — вода, д — фреон-11 (истечение в атмосферу).

Рис. 2. Температура пленки этанола.
 $p_k = 1300$ (1), 130 (2) Па.

что было ожидаемым. Наиболее интересным оказалось поведение пристенной пленки воды. Превращение пленки воды в лед или снег при истечении в вакуум вполне укладывается в имеющиеся представления, однако ее подъем на всю высоту трубки в виде конденсата не был предсказуемым. В настоящее время в литературе имеются публикации по истечению воды в вакуум.

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. В то же время публикаций по исследованию истечения воды в вакуум в виде пристенной пленки со спутным потоком газа обнаружить не удалось. На настоящий момент дать однозначное объяснение полученного результата не представляется возможным.

Как отмечалось выше, кроме фотосъемки процесса истечения в экспериментах проводились измерения температуры пристенной пленки на наружной поверхности сопла. Результаты измерений позволили увидеть насколько в рассматриваемых условиях охлаждаются пленки жидкостей при различных абсолютных давлениях в вакуумной камере. Рисунок 2 иллюстрирует влияние давления в вакуумной камере на величину конечной температуры пленки этанола. Полученный результат имеет ясное объяснение, если допустить, что пленка этанола охлаждается до температуры, при которой давление насыщенных паров этанола становится близко к давлению в вакуумной камере. Другими словами, чем ниже давление в вакуумной камере, тем до более низких температур охлаждается пленка жидкости. Из рис. 2 видно, что при давлении в вакуумной камере $p_k = 1300$ Па пленка этанола охлаждается до температуры около -4 °С, а при $p_k = 130$ Па температура пленки понижается до -28 °С, что вполне коррелирует с температурной зависимостью давления насыщенных паров этанола. В случае с водой ситуация несколько иная вследствие ее параметров в тройной точке ($T = 0$ °С и $p = 611,7$ Па). Соответствующие результаты измерений приведены на рис. 3. Из них видно, что при $p_k = 1300$ Па пленка воды охлаждается до $T \approx 1,5$ °С, а при $p_k = 130$ Па она замерзает и охлаждается до $T \approx -5,5$ °С,

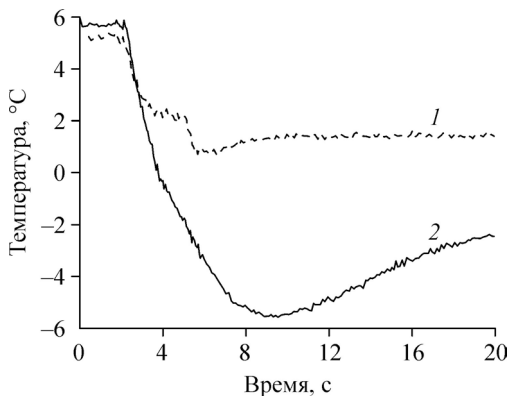
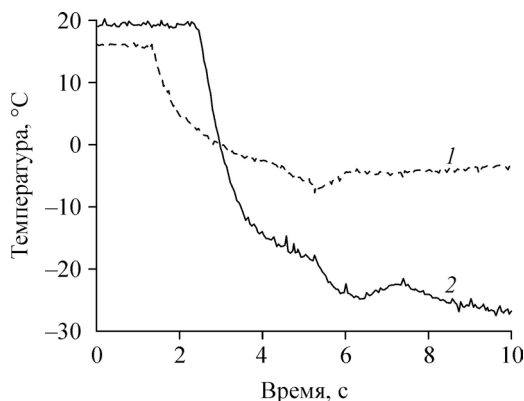


Рис. 3. Температура пленки воды.
 $p_k = 1300$ (1), 130 (2) Па.



что на качественном уровне не противоречит приведенным выше рассуждениям. В заключение отметим, что проведенные экспериментальные исследования позволяют лучше понять влияние фазовых превращений на характер истечения пристенных пленок жидкостей со спутным газовым потоком в вакуум.

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. Ч. 1. Модельные эксперименты // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 2. С. 279–296.
2. **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 РАН. 2004. Т. 39, № 5. С. 618–620.
3. **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. Vol. 109. P. 401–404.
4. **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.

Статья поступила в редакцию 10 июня 2015 г.