

Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

В. Г. Байдаков, С. А. Мальцев, Г. И. Пожарская,
В. П. Скрипов, Взрывное вскипание жидких азота
и кислорода при истечении через короткие насад-
ки, *ТВТ*, 1983, том 21, выпуск 5, 959–964

Использование Общероссийского математического портала Math-
Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользователь-
ским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.239.97.34

10 ноября 2024 г., 15:02:21



УДК 533.6.011.72

**ВЗРЫВНОЕ ВСКИПАНИЕ ЖИДКИХ АЗОТА И КИСЛОРОДА
ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЧЕРЕЗ КОРОТКИЕ НАСАДКИ***Байдаков В. Г., Мальцев С. А., Пожарская Г. И.,
Скрипов В. П.*

Исследованы расходные характеристики при истечении перегретых криогенных жидкостей из камеры высокого давления в атмосферу через насадки с диаметром отверстия $d=0,3-0,5$ мм и длиной $l=0,5-4,0$ мм. Опыты проведены по изобарам в интервале давлений $\pi=p/p_k=0,4-0,8$ и температур от 80 К до температуры насыщения. Для коротких насадок ($l/d \leq 3,5$) выявлено два характерных режима истечения: течение перегретой жидкости без вскипания в канале ($\tau < 0,9$) и критический режим истечения при спонтанном зародышеобразовании в насадке. Показано, что при истечении перегретой криогенной жидкости превышение давления в насадке над атмосферным в области $\tau < 0,9$ обусловлено главным образом ее испарением со свободной поверхности струи. Сформулирована задача об истечении перегретой жидкости при флуктуационном зародышеобразовании в канале.

Течение сжатой или насыщенной жидкости через короткие каналы и диафрагмы сопровождается ее перегревом. Если начальная температура жидкости соответствует области ее спонтанного вскипания при положительных давлениях, наблюдается запираение канала [1]. В настоящее время такие процессы широко исследуются для воды и других высокотемпературных теплоносителей применительно к анализу аварийных режимов ядерных реакторов [2-4]. Данные по вскипающим потокам криогенных жидкостей представляют интерес при разработке холодильных и газоректификационных установок, систем охлаждения ракетных двигателей и других низкотемпературных аппаратов. Вскипание струи перегретой жидкости приводит к ее очень тонкому распылу и может быть использовано в процессах получения аэрозоля.

В отличие от высокотемпературных жидкостей, особенно воды, где накоплен обширный экспериментальный материал по адиабатному течению жидкости со вскипанием, по исследованиям процессов истечения криогенных жидкостей имеются лишь отдельные работы [5, 6]. Эксперименты проводились в основном для относительно длинных каналов и сопел, когда в потоке успевает устанавливаться двухфазное равновесие, либо при достаточно малых давлениях (область низких температур). Данная работа посвящена изучению истечения жидких азота и кислорода в широком температурном интервале. Использовались насадки относительной длиной $L=l/d=1,2-12,7$, начальные давления на входе в канал достигали $\pi = p/p_k \approx 0,8$, где p_k — давление в критической точке.

Эксперимент. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Исследуемое вещество конденсировалось в камеру 1 внутренним диаметром 105 и высотой 160 мм. Давление в системе создавалось сжатым гелием и передавалось на жидкость через металлический сильфон 2. В опыте при заданных начальных значениях температуры T_0 и давления p_0 в камере определялось количество жидкости, вытекающей через насадок 3 в атмосферу за фиксированный промежуток времени Δt . Насадок изготовлены из меди. Перед монтажом их торцевые поверхности и проходное отверстие полировались. Истечение начиналось в момент открытия насадка с помощью быстродействующего электромагнитного затвора 4. При включении электромагнита 5 затвор смещается вниз, одновременно поворачиваясь на 90° . Устройство синхронизации 6 запускает частотомер-хронометр 8, рабо-

тающий в режиме измерения временных интервалов. Время выпуска жидкости задается электромагнитным реле времени 7. С помощью оптического датчика перемещений 9 по величине сжатия сильфона определялось количество вытекшей жидкости.

Рабочая камера монтировалась в металлическом криостате. Охлаждение производилось жидким азотом. Давление в системе измерялось пружинными манометрами класса 0,4, температура — медь-константановыми термопарами, работающими в комплексе с цифровым вольтметром Ф-30.

Погрешность определения температуры $\pm 0,2$ К, погрешность термостатирования не превышала $\pm 0,1$ К. В процессе истечения давление в камере поддерживалось постоянным ($\pm 2 \cdot 10^{-3}$ МПа) путем соединения газовой полости сильфона с ресивером. Суммарная погрешность определения удельного расхода не превышала $\pm 5\%$.

Использовались цилиндрические насадки с острыми кромками на входе и выходе канала. Диаметры отверстий $d=0,32; 0,40; 0,42; 0,50$ мм, длина $l=0,48; 1,47; 2,05; 2,30; 3,88; 4,05$ мм. Основной массив данных получен на коротком насадке с $d=0,4$ мм, $l=0,48$ мм, $l/d=1/2$. В опытах исследовалась температурная зависимость расхода при заданном значении давления в камере p_0 . Измерения проводились в интервале температур 88 К — температура насыщения $T_s(p_0)$. Паспортная чистота исследуемых веществ не хуже 99,5%. Специальная серия измерений выполнена с азотом особой чистоты (99,99%). Полученные значения расхода в пределах погрешности опыта совпали с данными по технически чистому азоту.

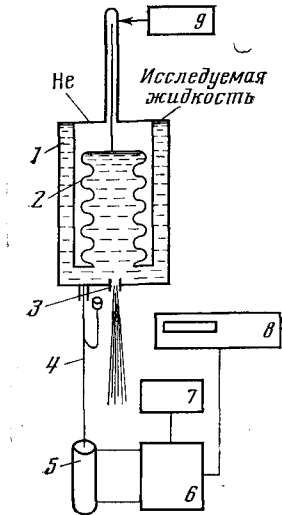


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Результаты. Удельный расход азота измерен при начальных давлениях жидкости в камере $p_0=1,28; 2,26; 2,75$ МПа. Опыты с кислородом проводились при $p_0=2,30; 3,00; 3,80$ МПа. Характер температурной зависимости удельных объемного q и массового j расходов существенно зависит как от размеров канала, так и от области параметров состояния (p, T), в которой проводились измерения (рис. 2, 3). Для относительно коротких каналов ($l/d \leq 4$) и приведенных давлений в камере $\lambda_0 = p/p_s \leq 0,5$ температурные зависимости q и j близки к прямым линиям до кривой фазового равновесия $T_s(p_0)$. При $\lambda_0 > 0,5$ наблюдаются изломы зависимостей $q(T)$ и $j(T)$. Температура, при которой происходит загиб расходной характеристики, слабо зависит от давления, незначительно увеличиваясь при росте давления. Увеличение относительной длины канала L с 1,2 до 3,5 (азот) приводит к небольшому понижению расхода в районе точки изломов. Отличия в значениях q и j для самого короткого канала ($L=1,2$) и каналов с $L < 3,5$ в районе точки излома уменьшаются с ростом давления.

Увеличение длины канала ($p_0 = \text{const}$) приводит к монотонному снижению расхода с ростом температуры (рис. 2, 3). Для кислорода на насадке с $d=0,40$ мм, $l=2,30$ мм при начальном давлении 3,0 МПа и $T_0 \approx 140$ К наблюдался излом расходной характеристики. После излома участок зависимости $j(T)$, соответствующий более высоким температурам, эквидистантен наблюдаемым на коротких насадках.

С целью проверки влияния нецилиндричности канала на величину расхода одна серия измерений для жидкого кислорода выполнена на коническом насадке. Угол раскрытия составлял $\sim 21'$, длина канала 2,0 мм, диаметр меньшего внутреннего сечения 0,42 мм. Расхождения в расходах, полученных в режимах конфузур-диффузор, составляли $\sim 10\%$.

Обсуждение полученных данных. Истечение жидкости через относительно короткие каналы характеризуется большой степенью метастабильности потока. При небольших перегревах ввиду малого времени нахождения жидкости в канале паровые пузырьки, зарождающиеся на готовых

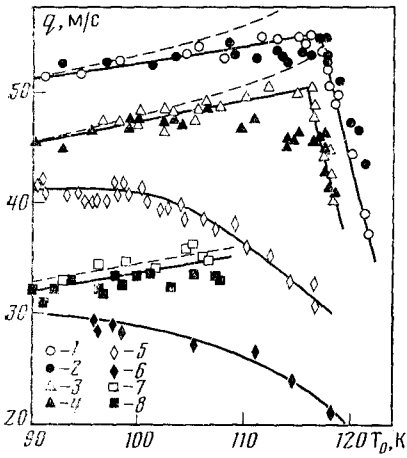


Рис. 2

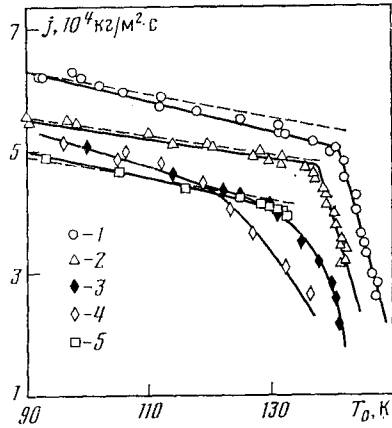


Рис. 3

Рис. 2. Удельный объемный расход азота: 1, 2 - $p_0=2,75$ МПа; 3-6 - 2,26; 7, 8 - 1,28. Размеры насадок: 1, 3, 7 - $d=0,40$ мм, $l=0,48$ мм; 2, 4, 8 - 0,42, 1,47; 5 - 0,50, 2,05; 6 - 0,32, 4,05. Пунктир - расчет по уравнению (1)

Рис. 3. Удельный массовый расход жидкого кислорода: 1 - $p_0=3,80$ МПа; 2-4 - 3,00; 5 - 2,30. Диаметр канала насадок $d=0,40$ мм, длина: 1, 2, 5 - $l=0,48$ мм; 3 - 2,30; 4 - 0,40. Пунктир - расчет по уравнению (1)

центрах кипения, не успевают достигнуть заметных размеров и обеспечить достаточно большое паросодержание в канале. Роль спонтанных центров парообразования при $\tau=T/T_K < 0,9$ (T_K - температура в критической точке) незначительна.

На рис. 2, 3 пунктиром показаны расходы, рассчитанные по гидравлической формуле

$$j = q\rho' = \mu \sqrt{2\rho'(p_0 - p)}, \quad (1)$$

где ρ' - плотность жидкости; μ - коэффициент расхода, определяемый при истечении холодной некипящей жидкости ($T=90$ К). Величина μ равна 0,61 для азота и 0,68 для кислорода. Для коротких каналов $L < 3,5$ результаты эксперимента до температур $\tau \approx 0,85$ в пределах 5% согласуются с рассчитанными по уравнению (1), что свидетельствует о незначительном парообразовании в канале.

Ввиду малых размеров отверстий в насадках экспериментальное определение давления и других локальных параметров потока в канале чрезвычайно затруднено. Для случая, когда парообразование в насадке незначительно, эти величины находились численным решением гидродинамической задачи. Моделировался процесс течения жидкого азота в насадке с диаметром отверстия $d=0,52$ мм и длиной $l=0,7$ мм. Учитывалось испарение жидкости со свободной поверхности струи. Считалось, что образующийся при этом пар имел скорость, равную скорости звука при температуре поверхности струи на срезе насадка и нулю при температуре струи, равной температуре нормального кипения жидкости. Тепловой поток с поверхности струи за счет испарения пропорционален теплоте парообразования. Предполагалось отсутствие скольжения между жидкостью и стенкой канала насадка.

Из законов сохранения массы, энергии и количества движения имеем

$$(\mathbf{q}\nabla)\mathbf{q} = -\frac{1}{\rho'} \text{grad } p + \nu \Delta \mathbf{q}, \quad (2)$$

$$(\nabla \mathbf{q}) = 0, \quad (3)$$

$$(\mathbf{q}\nabla)T = a\Delta T, \quad (4)$$

где \mathbf{q} - скорость течения; ν - кинематическая вязкость; a - температуропроводность.

Система уравнений (2)–(4) решалась численно в цилиндрической системе координат методом сеток. Использовалась неявная схема, ориентированная против потока [7]. При заданных массовом расходе j и температуре жидкости в камере T_0 в процессе интегрирования уравнений (2)–(4) вычислялись распределения давления, скорости и температуры в камере, насадке и в струе за насадком¹. Расчеты выполнены для $j=2,94 \cdot 10^4$, $3,39 \cdot 10^4$ и $4,16 \cdot 10^4$ кг·м⁻²с⁻¹ в интервале температур 70–110 К.

Сжимаемость жидкости не учитывалась. Температура внутри струи оставалась постоянной и равной температуре жидкости в камере. На выходе из насадка поверхность струи быстро охлаждалась и на расстоянии $z' \simeq 10^{-4}$ мм от выходного среза канала принимала температуру, равную температуре нормального кипения азота. Величина z' незначительно уменьшается с ростом начальной температуры. Струя при выходе из насадка сужается. Величина относительного сужения d_c/d растет по мере увеличения расхода и повышения температуры T_0 . При $T_0=110$ К и $j=2,94 \cdot 10^4$ кг·см⁻²с⁻¹ сужение составляет $\sim 89\%$.

Вызываемое обтеканием острого угла входной кромки насадка перераспределение скоростей в потоке начинается на расстоянии $z_1=d$ от входа в канал и заканчивается при прохождении входного сечения на расстоянии $z_2 \simeq d/2$. Эти величины хорошо согласуются с результатами прямых измерений для воды [9].

Распределение давления в камере и насадке на оси симметрии для трех значений T_0 показано на рис. 4. За счет конечной скорости испарения жидкости с поверхности струи в насадке устанавливается давление, превышающее атмосферное. Величина превышения тем больше, чем сильнее перегрета жидкость. При температуре $T_0=110$ К давление в насадке составляет $\sim 0,3$ МПа.

При глубоком вторжении в метастабильную область с ростом перегрева быстро увеличивается скорость флуктуационного образования зародышей паровой фазы

$$I = \rho' B \exp[-W_c / kT], \quad (5)$$

где B — кинетический коэффициент; W_c — работа образования критического пузырька. Так, в жидком азоте вблизи границы спонтанного вскипания возрастанию температуры на 1 К соответствует приращение I на десять порядков. Плотность готовых центров парообразования значительно слабее зависит от температуры, поэтому вскипание сильно перегретой жидкости происходит в основном на центрах флуктуационной природы (ударный режим вскипания [10]).

Рассмотрим задачу о флуктуационном вскипании жидкости в цилиндрических каналах. Процесс спонтанной конденсации паров воды в соплах Лавалья исследован в [11]. При постановке задачи о вскипании последуем этому методу. Введем ряд упрощающих предположений. Будем считать, что спонтанно образующиеся пузырьки равномерно распределены по объему жидкости и имеют скорость, равную скорости жидкости. Поток одномерен. Процесс истечения описывается системой уравнений, включающей уравнение неразрывности

$$\frac{d}{dz} j = \frac{d}{dz} (\rho q) = \frac{d}{dz} [\rho' q (1-x) + \rho'' q x], \quad (6)$$

где ρ — плотность парожидкостной смеси; x — объемное паросодержание в канале;

уравнение движения

$$\rho q dq / dz = -dp / dz - Q, \quad (7)$$

где Q — сила трения потока о стенки канала;

¹ Подробное описание процедуры расчета на примере истечения *n*-пентана дано в [8].

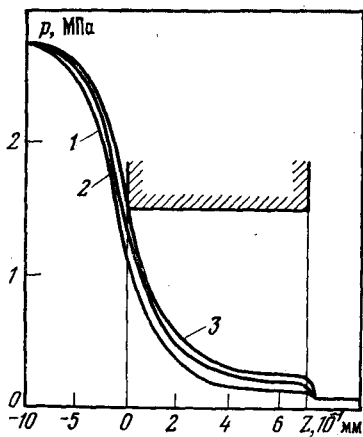


Рис. 4

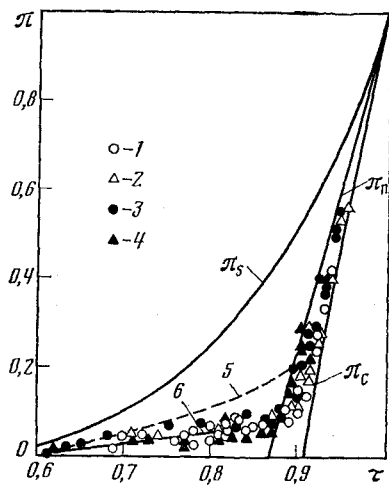


Рис. 5

Рис. 4. Распределение давления в камере и насадке ($p_0=2,75$ МПа): 1 - $T_0=90$ К; 2 - 100; 3 - 107

рис. 5. Приведенное давление в насадке ($d=0,40$ мм, $l=0,48$ мм) при истечении азота (светлые точки) и кислорода (темные точки): 1 - $p_0=2,26$ МПа; 2 - 2,75; 3 - 3,80; 4 - 3,00; 5 - данные по н-пентану и н-гексану [1]; 6 - результаты решения системы (2) - (4). Кривая π_s - линия насыщения; π_c - линия достижимых перегревов ($I=10^7$ м⁻³·с⁻¹); π_c - спинодаль

уравнение энергии

$$\frac{d}{dz} \left[j'' \left(i'' + \frac{q^2}{2} \right) + j' \left(i' + \frac{q^2}{2} \right) \right] = 0, \quad (8)$$

где i - удельная энтальпия; один штрих относится к жидкости, два - к пару.

Система уравнений (6) - (8) должна быть дополнена уравнением, описывающим скорость образования пузырьков в жидкости (5) и динамику их роста

$$\frac{d}{dz} j'' = \frac{d}{dz} \int_{z_s}^z m(z', z) I(z') dz', \quad (9)$$

где $m(z', z)$ - масса пузырька, образовавшегося в сечении после достижения им сечения z ; z_s - координата сечения, в котором жидкость достигает состояния насыщения ($I(z_s)=0$). Если рост пузырька лимитирует теплоподвод, то величина $m(z', z)$ может быть рассчитана в рамках теплового приближения [10]. Запирание канала соответствует граничное условие $(dp/dz)_{z_i}=\infty$. Система уравнений (6) - (9) может быть решена только численно. Результатом решения являются поля давления, температуры, паросодержания и скорости в насадке.

В данной работе, следуя [1], оценено давление в насадке из уравнения (1) по экспериментальным значениям расхода. К полученным данным вводилась поправка на охлаждение жидкости при ее квазиadiaбатическом расширении. Результаты вычислений в приведенных термодинамических координатах представлены на рис. 5. Там же показаны пограничная кривая, линия достижимого перегрева [12] ($I=10^7$ м⁻³·с⁻¹) и спинодаль жидких азота и кислорода. Как видно из рис. 2, 3, 5, запирание канала происходит, когда температура и давление в насадке лежат в полосе параметров состояния, ограниченной линией достижимых перегревов и спинодалью. Последнее свидетельствует о спонтанном (взрывном) вскипании жидкости в канале.

При течении без вскипания ($\tau < 0,88$) результаты численного решения задачи (уравнения (2) - (4), линия 6 на рис. 5) хорошо согласуются с

оценками давления по экспериментальным данным. Основной вклад в превышение давления в насадке над атмосферным дает в этой области параметров состояния сила реакции оттока пара с поверхности струи. Пунктиром показаны значения λ , τ в насадке при истечении жидких *n*-пентана и *n*-гексана [1]. В отличие от криогенных жидкостей здесь наблюдаются более высокие давления в канале.

УНЦ АН СССР
г. Свердловск

Поступила в редакцию
22.IX.1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Скрипов В. П., Шуравенко Н. А., Исаев О. А. ТВТ, 1978, т. 16, № 3, с. 563.
2. Фисенко В. В. Атомная техника за рубежом, 1975, № 7, т. 26.
3. Зысин В. А., Баранов Г. А., Барилевич В. А., Парфенова Т. Н. Вскипающие адiabатные потоки. М.: Атомиздат, 1976. 152 с.
4. Хлесткин Д. А., Канищев В. П. Теплоэнергетика, 1977, № 8, с. 69.
5. Bonnet F. W. Adv. Cryogenic Eng., 1967, v. 12, p. 427.
6. Campbell H. M., Overcamp T. J. Critical flowrate of two-phase nitrogen. NASA, TMX-53492, 1966. 24 p.
7. Госмен А. Д., Пан В. М., Ранчел А. К. и др. Численные методы исследования течения вязкой жидкости. М.: Мир, 1972. 323 с.
8. Пожарская Г. И., Дианов А. Е. В кн.: Перегретые жидкости и фазовые переходы. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1979, с. 49.
9. Хлесткин Д. А. Дис. на соискание уч. ст. докт. техн. наук. М.: ВТИ им. Ф. Э. Дзержинского, 1981. 319 с.
10. Скрипов В. П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
11. Вегенер П. П., Мак Л. М. В кн.: Проблемы механики. Вып. 3. М.: ИЛ, 1961, с. 254.
12. Байдаков В. Г., Скрипов В. П. ЖФХ, 1982, т. 56, № 4, с. 848.