

скорость звука в воздухе при начальной температуре ампулы. Из таблицы видно, что \dot{R} резко возрастает при $\tau > 0,9$.

При $\tau > 0,9$ давление в массиве жидкости после раскупорки падает до величин, близких к линии достижимых перегревов, когда начинает работать механизм гомогенного флуктуационного зародышеобразования [3]. Это обеспечивает появление в объеме жидкости большого числа спонтанно возникших пузырьков пара. Вскипание происходит достаточно быстро — за несколько десятков микросекунд. Именно наличие флуктуационного механизма зародышеобразования может обусловить взрывной характер вскипания, наблюдаемый в эксперименте.

Таким образом, при детальном описании процесса разгерметизации горячей ($\tau > 0,9$) жидкости необходимо учитывать, особенно на начальной стадии процесса, образование зародышей пара в массиве жидкости. Для этой цели может быть использована теория гомогенного флуктуационного зародышеобразования.

τ	\dot{R} , м/с	p_0 , МПа	a , м/с
0,80	150	0,63	396
0,85	165	1,06	408
0,90	155	1,60	420
0,92	175	1,86	424
0,95	685	2,45	431

ЛИТЕРАТУРА

1. Линхард, Аламгир, Трела. Начальная стадия снижения давления горячей воды при внезапном сбросе давления // Тр. Амер. о-ва инж.-мех. Сер. С. Теплопередача.— 1978.— Т. 100, № 3.
2. Исаев О. А., Павлов П. А. Вскипание жидкости в большом объеме при быстром сбросе давления // ТВТ.— 1980.— Т. 18, № 4.
3. Скрипов В. П. Метастабильная жидкость.— М.: Наука, 1972.

Поступила 24/IV 1987 г.

УДК 621.593

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАЦИИ АЗОТА В МОЛЕКУЛЯРНО-ВЯЗКОСТНОМ РЕЖИМЕ

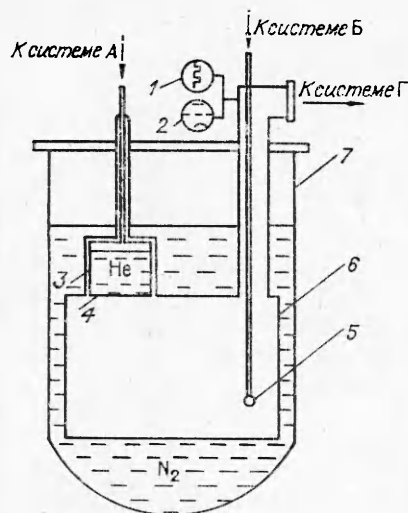
А. П. Крюков, А. В. Млынский

(Москва)

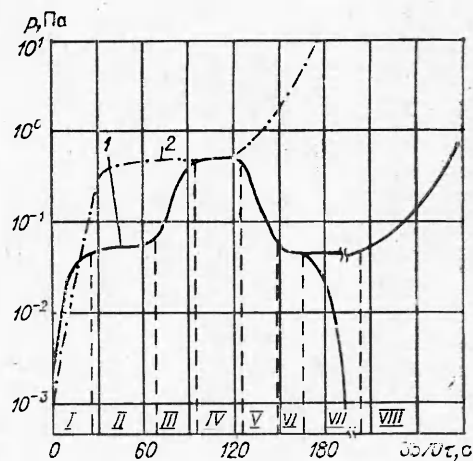
В настоящее время ощущается потребность в средствах создания высокого безмасляного вакуума для ряда областей науки и техники. Такие условия можно обеспечить при проведении форвакуумной откачки также безмасляным способом. Форвакуумная откачка азота, воздуха и других газов азотными, неоновыми и водородными насосами исследовалась в ряде работ (например, [1—10]). Процессы, реализующиеся при криооткачке гелиевыми форвакуумными насосами, изучены значительно меньше [3, 11].

В настоящей работе приведены описание установки, методики проведения экспериментов и результаты исследований криооткачки азота в диапазоне давлений от $4 \cdot 10^{-2}$ до 5 Па (чисел Кнудсена, рассчитанных по диаметру конденсирующей поверхности, от ~ 2 до 0,03). Конденсатором служила медная поверхность, охлаждаемая жидким гелием.

Описание экспериментального модуля. Экспериментальная установка, на которой проводились исследования по изучению криооткачки азота, состоит из четырех подсистем: А — система залива жидкого гелия и отвода паров гелия в газгольдер; Б — система, обеспечивающая непрерывный напуск азота в ходе эксперимента. Необходимый поток исследуемого газа устанавливается с помощью ряда ротаметров РМ-ГС разной производительности и регуляторов давления; В — экспериментальный модуль на базе серийного гелиевого криостата КГ-60/300; Г — система предварительного вакуумирования вакуумной камеры, состоящая из форвакуумного механического насоса, азотной ловушки и диффузионного высоковакуумного насоса.



Р и с. 1

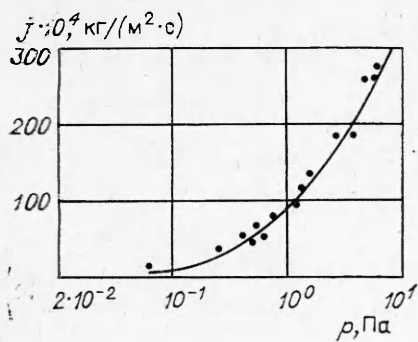


Р и с. 2

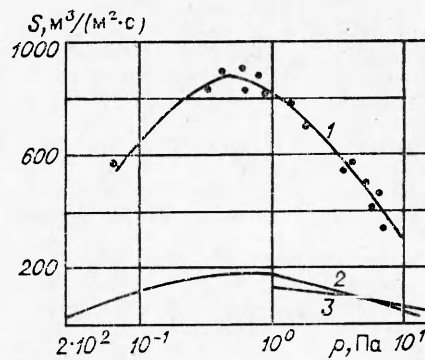
Экспериментальный модуль (рис. 1) связан со всеми подсистемами и состоит из серийного гелиевого криостата КГ-60/300 7, вакуумной камеры 6, гелиевого сосуда 3. Давление в системе измеряется с помощью термопарных ПМТ-4 1, ионизационных ЛМ-3-2 и ПМИ-10-2 2 вакуумметров. Подача газа осуществляется через распределительную сетку 5 в форме полусферы. Вакуумная камера погружена в ванну с жидким азотом. Все элементы экспериментального модуля изготовлены из нержавеющей стали (кроме медной крышки 4 гелиевого сосуда).

Методика проведения исследований. Захлаживание вакуумной камеры жидким азотом производится после десятичасовой откачки ее диффузионным высоковакуумным насосом и достижения давления $4 \cdot 10^{-2}$ Па. При заливе N_2 давление понижается до $3 \cdot 10^{-4}$ Па. Затем заливается жидкий гелий и давление в вакуумной камере понижается до $7 \cdot 10^{-5}$ Па. Газообразный азот напускается после того, как жидкий гелий полностью покрывает конденсирующую поверхность (заключение об этом делается по показанию гелиевого уровнемера, изготовленного из ниобий-титанового сверхпроводящего сплава и установленного внутри гелиевого сосуда). В течение всего напуска азота вакуумметрами измеряется и фиксируется давление p датчиками 1 и 2. Характерные зависимости представлены на рис. 2, τ — время напуска азота, с. Площадь конденсирующей поверхности равна $4,4 \cdot 10^{-3}$ м², площадь кольцевого зазора между гелиевым сосудом и вакуумной камерой $6,3 \cdot 10^{-4}$ м², поэтому принималось, что конденсация происходит только на поверхности криопанели 4. При возникновении необходимости повторения эксперимента гелий выпаривался, вакуумная камера откачивалась системой предварительного разрежения и гелий заливался вновь.

Обсуждение основных результатов. На рис. 2 представлены характерные зависимости $p(\tau)$ для различных значений j , линия 1 отвечает потоку напускаемого азота $j = 0,38 \cdot 10^{-3}$ кг/(с · м²), 2 — $j = 6,45 \cdot 10^{-3}$ кг/(с · м²). В начале напуска азота (для всех рассматриваемых случаев) давление в вакуумной камере за короткий промежуток времени возрастало до соответствующего данному j значения (участок I, зависимость I). В течение напуска давление в вакуумной камере оставалось постоянным (участок II). Если во время напуска азота увеличить (участок III) или уменьшить (участок V) значение j , то возрастает (участок IV) или понижается (участок VI) давление в вакуумной камере, причем каждому j отвечает определенное значение p . Отмеченные тенденции связаны со спецификой процессов массообмена на межфазной поверхности твердого осадка. Величины массового потока и коэффициента конденсации азота β_k взаимосвязаны,



Р и с. 3



Р и с. 4

что приводит к установлению вполне определенного давления для конкретного значения j .

С прекращением напуска давление в вакуумной камере понижалось до исходного (участок VII). Если же продолжать напуск, то через некоторое время (разное для каждого j) давление в вакуумной камере резко увеличивается (участок VIII), последний эффект объясняется тем, что с ростом толщины криослоя происходит повышение температуры его поверхности (так как теплопроводность криосада — величина конечная), а значит, уменьшается β_k .

На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость $j = j(p)$, полученная на описанной выше установке и количественно отражающая взаимосвязь между удельным массовым потоком азота j , подаваемым в вакуумную камеру, и давлением p , которое устанавливается в стационарном режиме конденсации.

На рис. 4 для сравнения представлены зависимости быстроты действия чистой от осадка поверхности S от давления в вакуумной камере при напуске азота: 1 — зависимость $S(p)$, полученная на описанной выше установке и рассчитанная по формуле $S = jRT_r/p$, где j — удельный массовый поток азота, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; R — индивидуальная газовая постоянная для азота, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; T_r — температура подаваемого газа, $T_r \approx 293\text{—}300\text{ К}$; p — давление в вакуумной камере при стационарном режиме, Па ; 2 — зависимость $S(p)$, найденная авторами [6] при конденсации азота на поверхность, охлаждаемую жидким неоном (температура криоповрежности $27,1\text{ К}$, температура азота 293 К); 3 — зависимость $S(p)$, полученная авторами [2] при конденсации азота на поверхность, имеющую температуру $T_k = (18 \pm 2)\text{ К}$ (температура азота 80 К).

Из рассмотрения представленных кривых следует, что значения S , найденные в настоящей работе, существенно больше соответствующих значений для зависимостей 1 и 2. Объясняется это тем, что давление измерялось в плоскости криопанели, а не в откачиваемом объеме или соединительном трубопроводе. Не менее существенно также и то, что в результате формирования достаточно сложной структуры газодинамического течения в камере процесс непосредственного натекания на поверхность 4 (см. рис. 1) протекает значительно интенсивней, чем при традиционной схеме подачи. Известно, например, сильное увеличение интенсивности конденсации углекислого газа на криопанели для струйного натекания в сравнении со свободным, отмеченное в [4].

Авторы благодарят А. В. Кротова, А. И. Бычкова и Е. В. Сидорова за помощь в проведении экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Холод Ю. В., Юферов В. Б. О режимах работы конденсационных азотных криососов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика. — 1982. — Вып. 3(21).

2. Иванов В. Н., Леонов В. В. и др. Исследование процесса криооткачки CO_2 и N_2 в молекулярно-вязкостном режиме // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника высокого вакуума.— 1977.— Вып. 2(8).
3. Сороковой Л. Г., Скибенко Е. И. и др. Некоторые физические основы конденсационной откачки в форвакуумной области давлений // Там же.
4. Великанов Е. Г., Ребров А. К. Некоторые вопросы конденсации газового потока низкой плотности на холодных поверхностях // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук.— 1970.— № 13, вып. 3.
5. Великанов Е. Г., Куликов В. П., Тимошенко Н. И. Криогенно-вакуумные сотовые насосы в условиях переходного режима // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика.— 1978.— Вып. 4(4).
6. Батраков В. П., Кравченко В. А., Волков Ю. Н. Криооткачка с помощью жидкого неона в диапазоне $10^5 \dots 10^{-1}$ Па // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика.— 1982.— Вып. 3(21).
7. Сайдадь Г. И., Жебровский А. К., Куприянов В. И. Быстрота действия криопанели с учетом переменной толщины криосадка при откачке углекислого газа криоконденсационным форвакуумным насосом // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Общая и ядерная физика.— 1985.— Вып. 1(30).
8. Davey G. Cryopumping in the transition and continuum pressure region // Vacuum.— 1976.— V. 26, N 1.
9. Bland M. E. The cryopumping of water vapour in the continuum pressure region // Cryogenics.— 1975.— N 11.
10. Nord J. Condensation of dry air on a liquid hydrogen cooled surface in the pressure range 10^{-3} to 10 torr (Knudsen number of 10^{-4} to 1) // Cryogenics.— 1966.— V. 6, N 5.
11. Tzemos C., Gegenheimer M., Hood C. Design and performance of a liquid helium cryopump operating in the viscous flow regime // Adv. Cryog. Engng.— 1986.— V. 31.— P. 575.

Поступила 7/IV 1987 г.

УДК 532.529

ТЕПЛОБМЕН И ТРЕНИЕ В ДВУХФАЗНОМ ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ НА ПЛАСТИНЕ

А. М. Гришин, В. И. Забарин
(Томск)

Течение в двухфазном пограничном слое в условиях скоростной неравновесности без теплообмена рассматривалось в [1—3], а при наличии скоростной и температурной неравновесности и теплообмена — в [4, 5].

В данной работе получены численные и приближенные аналитические решения задачи о двухфазном ламинарном пограничном слое на пластине со сжимаемой несущей фазой в условиях скоростной и температурной неравновесности при наличии теплообмена с поверхностью в дозвуковом режиме течения.

1. Постановка задачи. Рассмотрим течение газозвеси частиц в пограничном слое около пластины, установленной параллельно невозмущенному потоку. Предположим, что объемная доля химически инертных сферических частиц мала, локальные характеристики течения незначительно отличаются от среднеобъемных, физическая плотность частиц намного больше плотности несущей фазы, а броуновское движение частиц несущественно. Тогда при малых числах Маха течение газозвеси описывается системой уравнений в безразмерной форме [1, 3]:

$$(1.1) \quad \begin{aligned} \frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} &= 0, \quad \frac{\partial}{\partial x} \rho_s u_s + \frac{\partial}{\partial y} (\rho_s v_s) = 0, \\ \rho \frac{du}{dt} &= \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) - f_{s,x}, \quad \rho \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial y} \right) - q_s, \quad \rho = \frac{1}{T}, \\ \rho_s \frac{d_s u_s}{dt} &= f_{s,x}, \quad \rho_s \frac{d_s v_s}{dt} = f_{s,y}, \quad \rho_s \frac{d_s T_s}{dt} = q_s, \\ \frac{d}{dt} &= u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y}, \quad \frac{d_s}{dt} = u_s \frac{\partial}{\partial x} + v_s \frac{\partial}{\partial y}. \end{aligned}$$

Здесь $x = x'/L$, $y = y'/(L \text{Re}^{1/2})$ — безразмерные координаты (ось x направлена вдоль пластины, а ось y — по нормали к ней); $u = u'/u'_\infty$.