

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Райзер Ю. П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений.— М.: Наука, 1966.
2. Шидловский В. П. Развитие динамических возмущений на начальной стадии точечного взрыва в теплопроводном газе // ПМТФ.— 1978.— № 1.
3. Зельдович Я. Б., Компанеев А. С. К теории распределения тепла при теплопроводности, зависящей от температуры // К 70-летию А. Ф. Иоффе.— М.: Изд-во АН СССР, 1950.
4. Олейник О. А., Калашников А. С., Юй-Линь Чжоу. Задачи Коши и краевые задачи для уравнения типа нестационарной фильтрации // Изв. АН СССР. Сер. мат.— 1958.— Т. 22, № 5.
5. Покровский Л. Д., Тараненко С. Н. Об особенностях распространения волн в газовой динамике с нелинейной теплопроводностью // Тр. МВТУ.— 1982.— № 374.
6. Вазов В. Асимптотические разложения решений обыкновенных дифференциальных уравнений.— М.: Мир, 1968.
7. Васильева А. Б., Бутузов В. Ф. Асимптотические разложения решений сингулярно возмущенных уравнений.— М.: Наука, 1973.
8. Волосевич П. П., Курдюмов С. П. и др. Решение одномерной плоской задачи о движении поршня в идеальном теплопроводном газе // ЖВММФ.— 1963.— № 1.
9. Лефшец С. Геометрическая теория дифференциальных уравнений.— М.: ИЛ, 1961.
10. Постон Т., Стюарт И. Теория катастроф и ее приложения.— М.: Мир, 1980.

Поступила 8/IV 1987 г.

УДК 536.423

РАЗЛЕТ ГОРЯЧЕЙ ЖИДКОСТИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ОБОЛОЧКИ

О. А. Исав, М. В. Неволин, В. П. Скрипов, С. А. Уткин

(Свердловск)

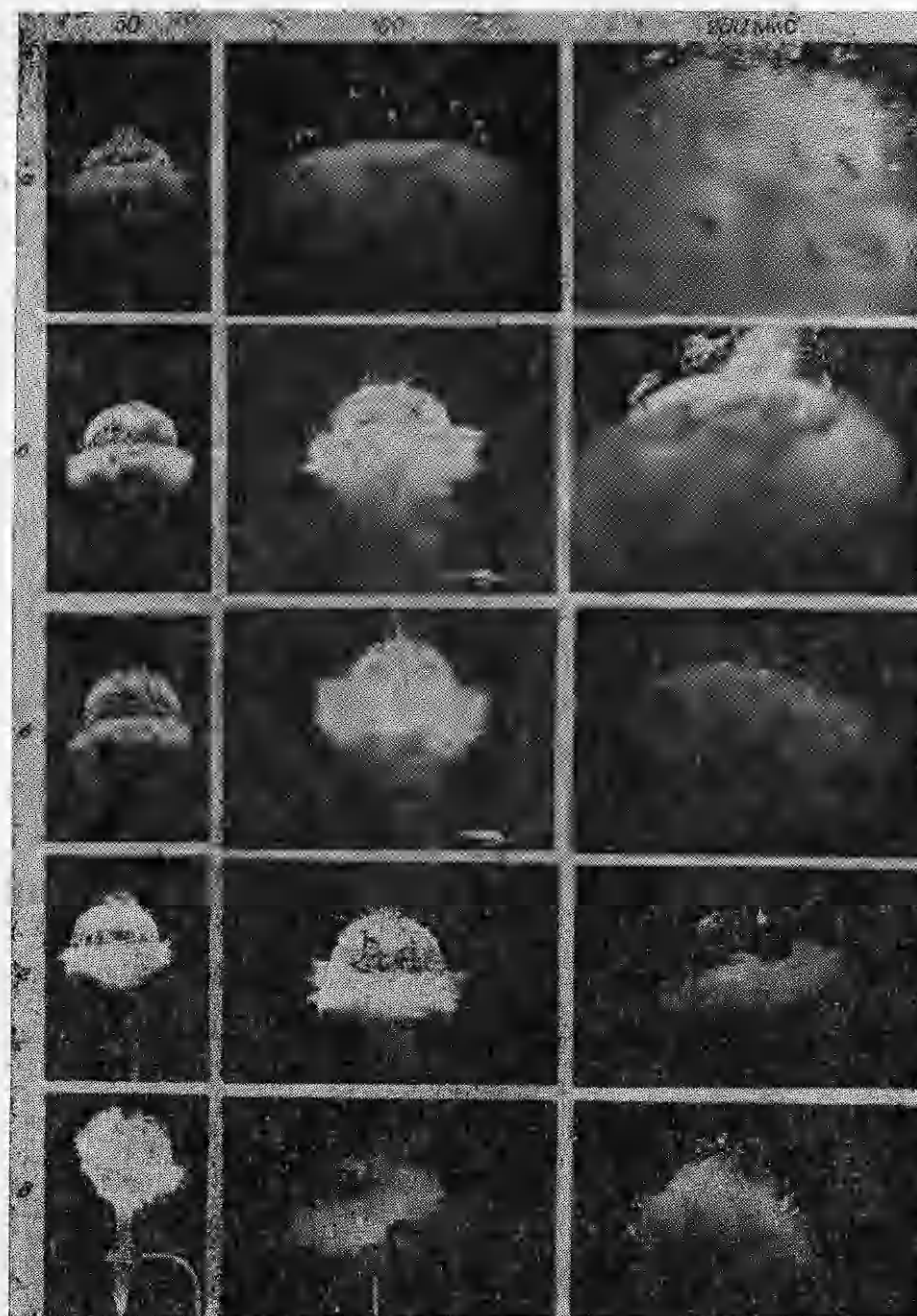
В современных технических устройствах встречаются процессы, сопровождаемые быстрым падением давления в жидкости ниже давления насыщенных паров. В частности, быстропротекающим и существенно нестационарным процессом такого типа является разгерметизация макроскопического объема горячей жидкости — взрыв сосуда. Математическое описание такого взрыва затруднено наличием фазового перехода.

В [1, 2] разгерметизировалась одна стенка сосуда, что сводило процесс фактически к истечению из трубы, т. е. к одномерной геометрии.

В данной работе проведено фотографирование процесса разлета горячего фреона-113 при разрушении стеклянной ампулы. Предполагалось исследовать влияние начальной температуры жидкости на скорость разлета взрывного облака в той области параметров состояния, где может проявляться интенсивное спонтанное зародышеобразование в метастабильной жидкости [3].

Экспериментальная установка представляет собой металлическую камеру в виде куба с длиной стороны 50 см. Камера имеет два окна — в верхней и боковой гранях. Через верхнее окно осуществляется подсветка лампой вспышкой, через боковое — фотосъемка. Световой импульс длительностью около 1 мкс создается воздушным разрядником.

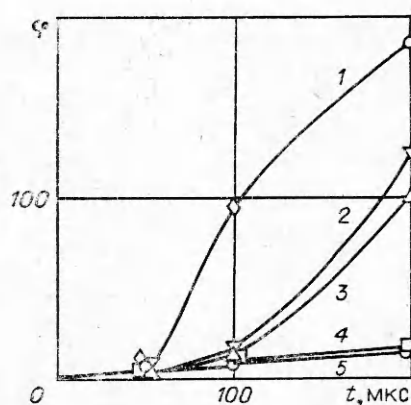
В качестве рабочего вещества выбран фреон-113, негорючее, нетоксичное соединение. Низкие значения критических параметров ($T_c = 487.2$ К, $p_c = 3,41$ МПа) позволили использовать ампулы из отожженного стекла с толщиной стенки 0,5 мм. Ампулы имеют форму сферы диаметром 2,5 см, заполнение (около 4 г) выбиралось таким, чтобы граница раздела жидкость — пар находилась примерно посередине ампулы при всех температурах от комнатной до критической. Нагрев ампулы и всего объема камеры производился нагревателями, расположенными на стенках камеры. Температура измерялась медь-константановой термопарой, находящейся в тепловом контакте с ампулой. Начальная температура выбиралась в диапазоне от 388 К ($\approx 0,8 T_c$) до 487 К ($\approx T_c$). Разрушение ампулы инициировалось ударником, приводимым в движение пружиной. Датчиком начала разрушения была медная проволочка диаметром 0,03 мм, наклеенная на ампулу. Задержка вспышки от момента разрыва проволочки выбиралась в интервале от 0 до 1 мс.



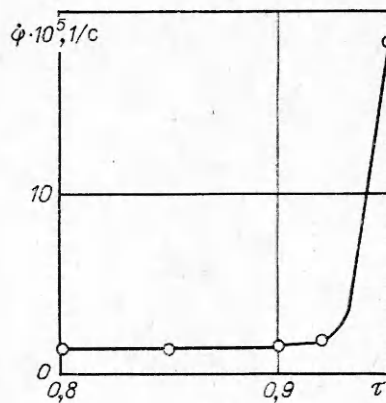
Р и с. 1

Для каждой из выбранных температур получены серии фотографий одинаковых образцов с различными временами задержки. На рис. 1, *a* — *д* представлены характерные фотографии взрывного облака для приведенных начальных температур $\tau = T_0/T_c = 0,95; 0,92; 0,90; 0,85; 0,80$ и времен задержки $t = 50; 100$ и 200 мкс. На фотографиях четко различима граница расширяющейся парожидкостной смеси. Хорошо видно, что скорость разлета облака увеличивается с ростом начальной температуры T_0 .

Измеряемый параметр — диаметр взрывного облака D , т. е. расстояние между наиболее удаленными друг от друга, крайними видимыми границами парожидкостной смеси. На рис. 2 приведена зависимость



Р и с. 2



Р и с. 3

относительного увеличения объема взрывного облака $\phi = (D/D_0)^3 - 1$ от времени (D_0 — диаметр ампулы) для $\tau = 0,95; 0,92; 0,90; 0,85; 0,80$ (линии 1—5).

Отсчет времени начинается после распространения трещин по стеклу и последующего разрыва проволоочки. В начальный момент инерция не позволяет осколкам ампулы мгновенно освободить поверхность жидкости. Можно рассчитать время, за которое осколки долетят до поверхности сферы с площадью, вдвое большей, чем площадь исходной ампулы, считая их движение равноускоренным. Это время для $\tau = 0,95$ ($\Delta p = 2,45$ МПа) равно 83 мкс. По экспериментальным данным граница взрывного облака распространяется на такое расстояние примерно за 30 мкс. Достаточно близкое к эксперименту время (35 мкс) получится, если рассчитать равноускоренное движение капли фреона-113 под действием такого же перепада давлений. Из приведенных оценок следует, что наличие стеклянных осколков не мешает распространению парожидкостного облака даже на начальной стадии процесса разлета.

Сразу же после разгерметизации ампулы по жидкости распространяется волна разрежения за время, примерно равное 20 мкс. За фронтом волны разрежения происходит вскипание жидкости и расширение образовавшейся парожидкостной смеси, причем скорость увеличения относительного объема растет с повышением начальной температуры.

Можно выделить две стадии парообразования при разгерметизации горячей жидкости: 1) образование и рост пузырей пара в массиве жидкости и испарение с внешней поверхности жидкости; 2) испарение множества мелких капель, на которые распадается первоначально однородная масса. Образование зародышевых пузырьков в объеме существенно на начальном этапе процесса, пока объемная доля пара $\alpha < 0,5$, т. е. пока имеется массив жидкости. От интенсивности зародышеобразования зависит дисперсность среды при дальнейшем расширении облака. Можно предположить, что чем больше пузырьков образуется в массиве жидкости на начальной стадии, тем больше поверхность раздела фаз и тем быстрее расширится облако при $\alpha > 0,5$.

На рис. 3 показана зависимость скорости парообразования от температуры. Скорость парообразования оценивалась по двум точкам при $t_1 = 50$ мкс и $t_2 = 100$ мкс: $\dot{\phi} = (\phi_{100} - \phi_{50})/5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ (ϕ_{50} и ϕ_{100} — относительные увеличения объема при 50 и 100 мкс). На рис. 3 хорошо видно резкое увеличение скорости парообразования при $\tau > 0,9$.

В таблице даны величины абсолютной скорости границы взрывного облака R и начального давления внутри ампулы p_0 в зависимости от приведенной температуры. Скорость границы облака также определялась по двум точкам $t_1 = 50$ мкс и $t_2 = 100$ мкс. Для сравнения дана также

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.