

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДЕЛЬНОГО ПЕРЕГРЕВА ЧИСТЫХ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ РАСТВОРОВ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РАСТЯЖЕНИИ

### АННОТАЦИЯ

Экспериментально изучен предельный перегрев 12 чистых жидкостей и двух газонасыщенных растворов в волне отрицательного давления. В работе использовался метод объемного перегрева жидкости в волне отрицательного давления и метод импульсного перегрева жидкости на поверхности платинового нагревателя при прохождении через него волны отрицательного давления. Получены зависимости температуры предельного перегрева исследованных жидкостей от давления в области отрицательных давлений до  $-18$  МПа. Показано удовлетворительное согласие экспериментальных результатов и расчетов по формулам классической теории гомогенного зародышеобразования для всех исследованных жидкостей, кроме воды. Исследовано влияние растворенного в жидкости диоксида углерода на предельный перегрев этилового спирта и гексадекана в волне отрицательного давления.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Растянутая жидкость или жидкость при отрицательных давлениях всегда находится в метастабильном состоянии по отношению к линии фазового равновесия жидкость-пар, поскольку паровая фаза может существовать только при положительных давлениях. На практике растянутое состояние жидкости реализуется чаще всего при быстрых гидродинамических процессах, когда в жидкости возникают локальные растяжения. Наиболее известным случаем возникновения и разрушения растянутого состояния жидкости является кавитация и кавитационное разрушение материалов [1].

В медицине повсеместное применение находят аппараты для ультразвуковых исследований. Их работа сопровождается созданием кратковременных импульсов отрицательного давления в тканях человека, которые на 90% процентов заполнены жидкостью. Повышение интенсивности ультразвукового излучения с целью детализации картины внутренних органов может приводить к ультразвуковой кавитации и кавитационному повреждению исследуемых органов. Несмотря на множество работ по исследованию кавитации жидкостей, систематических исследований вскипания растянутых жидкостей в широкой области температур очень мало. Опираясь на имеющийся опыт по изучению предельного перегрева жидкостей при положительных давлениях [2–6], нами проведены экспериментальные исследования предельных перегревов ряда жидкостей и газонасыщенных растворов в области отрицательных давлений.

### 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Для получения отрицательных давлений в жидкости использовался метод инверсии волны давления при отражении от свободной поверхности [7]. Предварительно жидкость в камере обезгаживалась кипячением и откачкой форвакуумным насосом через вентиль (7). Короткая волна давления ( $\sim 3$  мкс) формировалась дюралевой мембраной (5) при разряде малоиндуктивного конденсатора на плоскую катушку (4). Амплитуда импульса давления измерялась пьезокерамическим датчиком давления. Перед началом опытов проводилась градуировка установки. Погрешность измерения давления составляла  $\sim 5\%$ .

В опытах по объемному вскипанию растянутой жидкости фотографировалась через микроскоп центральная часть жидкости в камере на глубине 3–5 мм от поверхности при прохождении через нее волны отрицательного давления. По фотографиям определялось начало интенсивного образования кавитационных пузырей в волне отрицательного давления (рис. 2). Частота нуклеации в этих опытах составляла  $J=10^{12} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

В опытах по импульсному перегреву жидкость перегревалась на тонкой платиновой проволочке (диаметр – 20 мкм, длина  $\sim 10$  мм), погруженной на 3–5 мм в исследуемую жидкость. Высота столба жидкости в камере составляла 40–45 мм. Проволочка (1), включенная в мостовую схему, разогревалась прямоугольными импульсами тока длительностью 15...25 мкс. Вскипание жидкости на проволочке происходило в момент прохождения волны отрицательного давления и сопровождалось появлением высокочастотной составляющей на греющем импульсе (рис. 3). Высокочастотный импульс обусловлен изменением теплоотдачи от проволочки в результате появления на ней паровой пленки. Сигнал вскипания усиливался и подавался на осциллограф. По положению начала импульса вскипания с помощью мостовой схемы определялась температура проволочки в момент начала флуктуационного вскипания. Погрешность определения температуры не превышала 3 °С. Подробно методика измерения температуры вскипания жидкости на тонких проволочных нагревателях описана в работе [4]. Частота нуклеации в этих опытах достигала  $J=10^{24} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ .

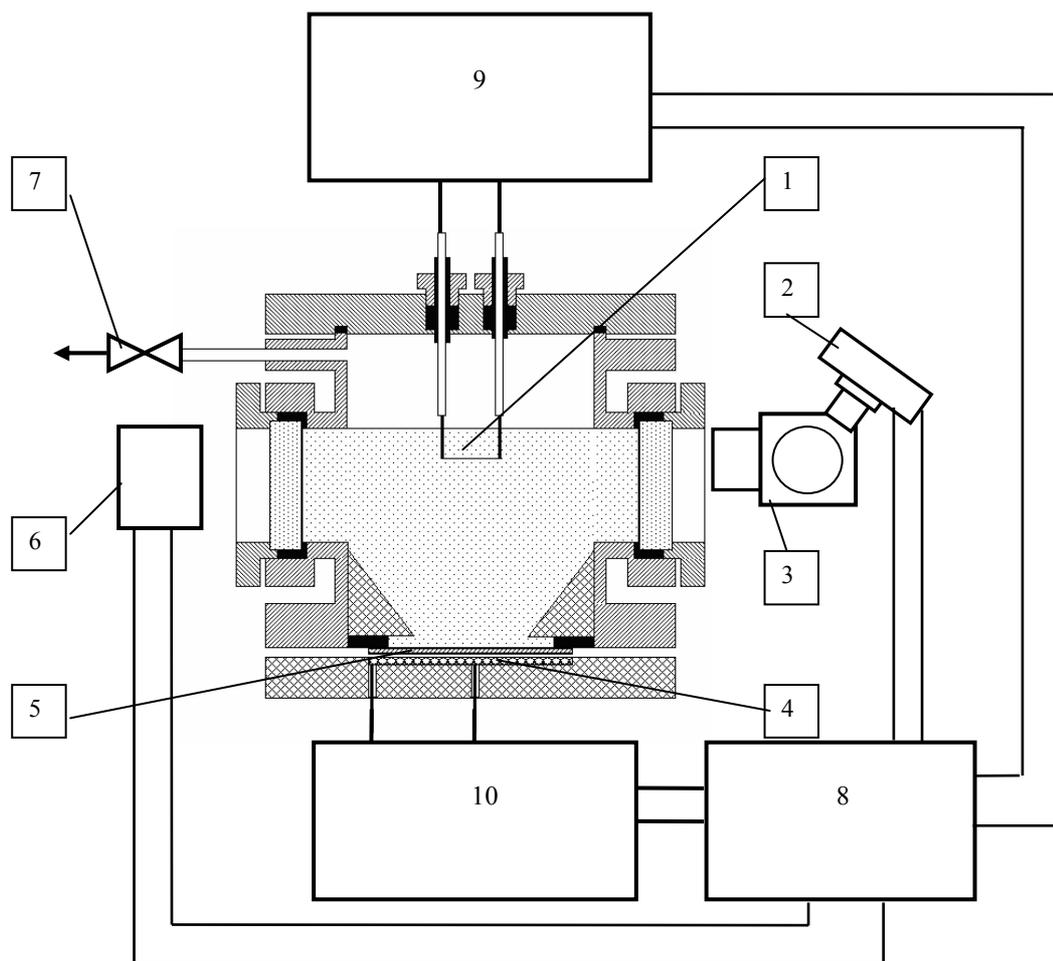


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – проволочный нагреватель; 2 – фотоаппарат; 3 – микроскоп; 4 – катушка для создания импульсного магнитного поля; 5 – мембрана; 6 – импульсный осветитель; 7 – запорный вентиль; 8 – блок управления; 9 – блок нагрева проволочки и измерения температуры; 10 – генератор импульса тока

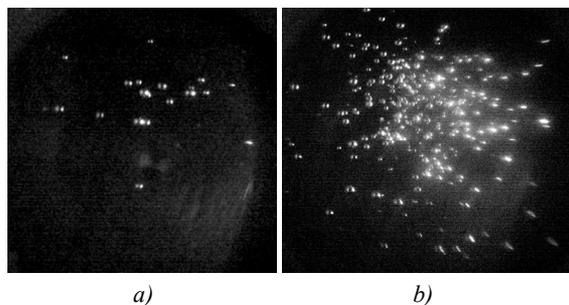


Рис. 2. Объемное вскипание гексадекана в волне отрицательного давления: *a* –  $p = -9$  МПа; *b* –  $p = -12$  МПа

В опытах с газонасыщенными жидкостями насыщение жидкости газом осуществлялось через вентиль (7) из ресивера в течение нескольких часов. Об окончании растворения и установлении равновесной концентрации газа в жидкости судили по стабилизации давления в ресивере и температуры предельного перегрева жидкости на проволочке при постоянном давлении в жидкости. Концентрация растворенного в жидкости газа определялась расчетом с использованием известных литературных данных по растворимости диоксида углерода в исследованных жидкостях [8–11].

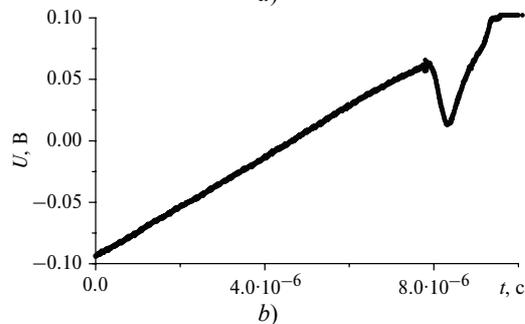
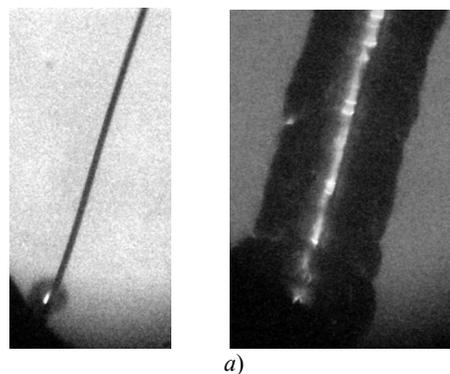


Рис. 3. Вскипание перегретой жидкости на платиновой проволочке: *a* – фотографии проволочки до вскипания и после, *b* – осциллограмма изменения напряжения на проволочке

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Получены зависимости температуры предельного перегрева 12 жидкостей от давления в области отрицательных давлений от атмосферного до  $-18$  МПа. Результаты показаны на рис. 4 в приведенных координатах  $\tau = T/T_K, \pi = p/p_K$ . Здесь  $T_K, p_K$  – температура и давление в термодинамической критической точке. Результаты опытов для всех жидкостей, кроме воды, ложатся с некоторым разбросом на одну кривую. Ранее [2,3] было показано, что экспериментальные данные по температуре достижимого перегрева различных жидкостей следуют правилу термодинамического подобия и коррелируют с критерием подобия Л.П. Филиппова. Качественно корреляция выполняется и для температур предельного перегрева жидкостей при отрицательных давлениях. Количественно она прослеживается не столь строго, как при положительных давлениях, вследствие большей погрешности в измерениях  $T, p, J$  в наших опытах. На рисунке приведены результаты расчета  $T(p)_J$  для н-гексана при  $J = 10^{24} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Согласно теории гомогенной нуклеации частота зародышеобразования  $J$  определяется выражением [2]:

$$J = N_1 B \exp(-W_k / kT). \quad (1)$$

Здесь  $N_1$  – число молекул в единице объема жидкости;  $B$  – кинетический коэффициент  $\sim 10^{-11} \text{ с}$ , слабо зависящий от температуры. Ранее было показано, что величина  $B$ , рассчитанная по разным вариантам теории нуклеации, изменяется в пределах погрешности эксперимента [3]. В данной работе кинетический коэффициент  $B$  рассчитывался по формуле для вязкой жидкости [12]:

$$B = \frac{N_1 r_k}{2\eta} \sqrt{kT\sigma}, \quad (2)$$

где  $r_k = 2\sigma / (P_S - P')$  – радиус критического пузырька;  $\eta$  – вязкость жидкости;  $W_k$  – работа образования критического пузырька:

$$W_k = \frac{16\pi\sigma^3}{3(P_S - P')^2 (1 - v'/v'')^2}, \quad (3)$$

где  $P'$  – давление в жидкости;  $v', v''$  – удельные объемы жидкости и пара соответственно.

В целом наблюдается удовлетворительное согласие результатов расчета и опытов. Это указывает на пригодность теории гомогенной нуклеации для оценки предельных перегревов растянутой жидкости до  $\pi = -(4-6)$ .

Изучено влияние газонасыщения на предельный перегрев гексадекана и этилового спирта при отрицательных давлениях до  $-12$  МПа. Результаты опытов показаны точками на рис. 5 и 6. Штриховыми линиями показаны результаты расчета по формулам (1)–(3). В случае гексадекана наблюдается слабая зависимость температуры предельного перегрева жидкости от насыщения газом до 15 мольных про-

центов. Влияние растворенного газа уменьшается при понижении температуры. Опыты при комнатной температуре показали, что растворенный в гексадекане диоксид углерода практически не влияет на вскипание жидкости при импульсном растяжении. Ранее нами было обнаружено подавление центров кавитации в воде растворенным диоксидом углерода [13].

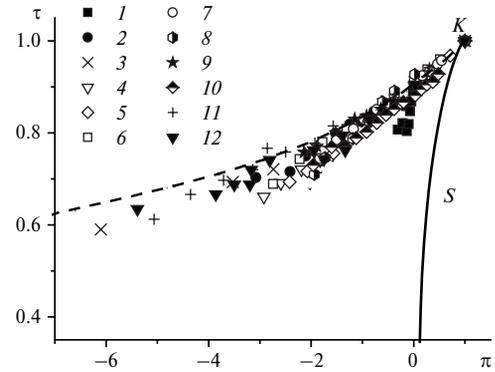


Рис. 4. Зависимости температуры предельного перегрева жидкостей от давления в приведенных координатах:  $\pi = P/P_K, \tau = T/T_K$ ; 1 – вода; 2 – диэтиловый эфир; 3 – н-гексан; 4 – н-гептан; 5 – бензол; 6 – толуол; 7 – этиловый спирт; 8 – изобутиловый спирт; 9 – фреон 11; 10 – аргон; 11 – гексадекан; 12 – н-пентан; штриховая линия – расчет по формулам (1)–(3) для н-гексана; S – бинодаль н-гексана

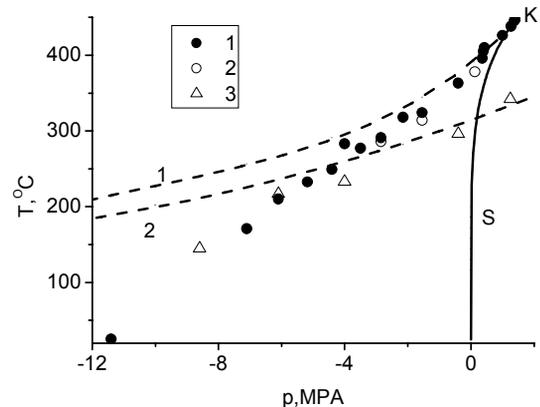


Рис. 5. Зависимости температуры предельного перегрева гексадекана от давления для разных концентраций диоксида углерода: 1 – гексадекан; 2 – раствор  $\text{CO}_2$  в гексадекане с мольной долей  $\text{CO}_2$  5%; 3 – раствор  $\text{CO}_2$  в гексадекане с мольной долей  $\text{CO}_2$  15%; S – бинодаль гексадекана; штриховые линии – расчет по формулам теории гомогенной нуклеации для  $J=10^{24} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ : 1 – гексадекан; 2 – 15%  $\text{CO}_2$  в гексадекане

В случае этилового спирта влияние растворенного газа даже несколько усиливается с понижением температуры. Наблюдается большое расхождение между расчетом и экспериментальными результатами для больших концентраций диоксида углерода.

Возможно, это обусловлено снижением поверхностного натяжения этанола при растворении в нем диоксида углерода. Поскольку в расчетах использо-

вались значения поверхностного натяжения этанола из-за отсутствия данных по поверхностному натяжению растворов этиловый спирт – диоксид углерода.

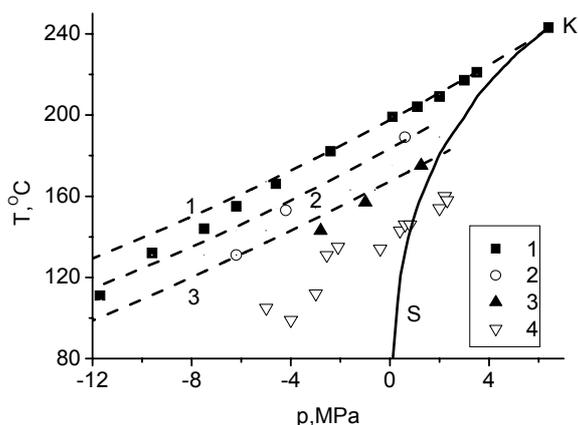


Рис. 6. Зависимости температуры предельного перегрева этилового спирта от давления для разных концентраций диоксида углерода: 1 – этиловый спирт; 2 – раствор CO<sub>2</sub> в спирте с мольной долей CO<sub>2</sub> 5%; 3 – раствор CO<sub>2</sub> в спирте с мольной долей CO<sub>2</sub> 10%; 4 – раствор CO<sub>2</sub> в спирте с мольной долей CO<sub>2</sub> 15%. Сплошная кривая S – бинадаль; штриховые линии – расчет по формулам теории гомогенной нуклеации для  $J=10^{24} \text{ м}^{-3} \text{ с}^{-1}$ : 1 – этиловый спирт; 2 – 5% CO<sub>2</sub> в этаноле; 3 – 15% CO<sub>2</sub> в этаноле

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные исследования предельного перегрева большого массива жидкостей в области отрицательных давлений показали, во-первых, возможность значительных перегревов растянутой жидкости, во-вторых, пригодность классической теории гомогенной нуклеации для оценки предельных перегревов растянутой жидкости до отрицательных давлений составляющих по абсолютной величине (5–6) критических давлений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 04-02-16251).

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

$p$  – давление, Н/м<sup>2</sup>;

$T$  – температура, °С;

$J$  – частота зародышеобразования, м<sup>-3</sup> с<sup>-1</sup>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кнэпп Р., Дейлл Дж., Хэммит Ф. Кавитация. М.: Мир, 1974. 687 с.
2. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
3. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии / В.П. Скрипов, Е.Н.Синицын, П.А. Павлов и др. М.: Атомиздат, 1980. 208 с.
4. Павлов П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. Свердловск, 1988. 248 с.
5. Байдаков В.Г. Перегрев криогенных жидкостей. Екатеринбург: УрО РАН, 1995. 264 с.
6. Ермаков Г.В. Термодинамические свойства и кинетика вскипания перегретых жидкостей. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 272 с.
7. Бесов А.С., Кедринский В.К., Пальчиков Е.И. О пороговых кавитационных эффектах в импульсных волнах разрежения // Письма в ЖТФ. 1989. Т. 15. Вып. 16. С. 23–27.
8. Sebastian H.M., Simnick J.J., Lin H., Chao K. Vapor-liquid equilibrium in binary mixtures of carbon dioxide + n-decane and carbon dioxide + n-hexadecane // J. Chem. Eng. Data. 1980. Vol.25. P. 138–140.
9. Tanaka H., Yamaki Y., Kato M. Solubility of carbon dioxide in pentadecane, hexadecane, and pentadecane + hexadecane // J.Chem.Eng.Data. 1993. Vol. 38. P.386–388.
10. Gilbert M.L., Paulaitis M.E. Gas-liquid equilibrium for ethanol-water-carbon dioxide mixtures at elevated pressures // J. Chem. Eng. Data. 1986. Vol.31.P. 296–298.
11. Jennings D.W., Lee R., Teja A.S. Vapor-liquid equilibrium in the carbon dioxide + ethanol and carbon dioxide + 1-butanol systems // J.Chem.Eng.Data. 1991. Vol. 36. P. 303–307.
12. Дерягин Б.В., Прохоров А.В., Туницкий Н.Н. Статистическая термодинамика образования новой фазы. II. Теория вскипания летучих жидкостей // ЖЭТФ. 1977. Т. 73. Вып. 5. С.1831–1848.
13. Виноградов В.Е. Влияние примесей на кавитационную прочность воды // Метастабильные состояния и фазовые переходы. Вып. 7. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. С. 81–87.