

УДК 536.423

# Исследование влияния акустических полей на время жизни перегретого н-пентана\*

Е. В. Липнягов, С. А. Перминов, М. А. Паршакова

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург;  
e-mail: parmari@yandex.ru

Поступила в редакцию 03.07.2018

Изучено влияние ультразвука на время жизни перегретого н-пентана в стеклянном капилляре при атмосферном давлении и температурах 100–130 °С (перегрев 63.9–93.9 °С). Процесс вскипания фиксировался с помощью скоростной видеосъемки. Показано, что при одновременном воздействии ультразвуковых полей двух разных частот можно снизить время ожидания вскипания вплоть до нуля.

Ключевые слова: зародышеобразование, перегрев, вскипание, ультразвук, н-пентан, скоростная видеосъемка.

## Введение

С воздействием ультразвука на вещество связано множество физико-химических эффектов. Ультразвуком диспергируют твердые тела, эмульгируют жидкости. Под его воздействием возникает эрозия твердых поверхностей, повышается активность катализаторов, ускоряются некоторые химические реакции. В звуковом поле наблюдается свечение жидкости (сонолюминесценция) [1]. Ультразвук также способствует вскипанию перегретой жидкости [2–6]. Изучение его влияния на данный процесс имеет большое значение как для понимания механизма вскипания, так и для конструирования некоторых технических устройств, в которых случайный и необратимый распад метастабильной фазы приводит к неустойчивой работе оборудования.

Влияние ультразвука на жидкость вблизи границы достижимого перегрева по теории гомогенного зародышеобразования исследовалось в работах [7–9]. В данной работе этот эффект изучен в области умеренных перегревов. Выявлены условия, при которых воздействие ультразвуковых колебаний приводит к мгновенному вскипанию перегретой жидкости.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Комплексной программы фундаментальных исследований Уральского отделения РАН (проект № 18-2-2-13).

## Методика эксперимента

В рамках данного исследования была разработана и изготовлена экспериментальная установка для изучения кинетики вскипания перегретой жидкости в ультразвуковом поле методом измерения времени жизни  $\tau$  перегретой жидкости [3, 4, 10–14]. На рис. 1 изображена блок-схема установки. Исследуемая жидкость (н-пентан чистотой 99.7%) находится в стеклянном капилляре 7, помещенном в термостатируемую проточную ячейку 6 (рис. 2). Постоянство температуры  $T$  в ячейке поддерживается циркуляционным термостатом JulaboSL-6 с погрешностью  $\pm 0.1$  °С. Для измерения и контроля температуры используются медь-константановые термопары 5 и вольтметр 8 (см. рис. 1). Капилляр имеет внутренний диаметр  $d=2.45$  мм и конусообразное расширение высотой 30 мм (см. рис. 2). Объем перегреваемой жидкости составляет  $2.36 \cdot 10^{-7}$  м<sup>3</sup>. К конусообразному торцу капилляра приклеена пластина 2 из керамики FM-12T диаметром 12 мм. Колебания пластины возбуждаются генератором ГЗ-33 14, позволяющим изменять частоту звуковой волны  $f_1$  от 9 до 106 кГц. Параметры колебаний контролируются с помощью осциллографа 15. Дополнительное воздействие ультразвукового поля на исследуемую жидкость обеспечивается погружением нижней конусообразной части капилляра

ляра 7 на разную глубину  $h$  ультразвуковой ванны 1. Мощность ультразвуковой ванны с частотой звуковых волн  $f_2 = 44$  кГц составляет 35W.

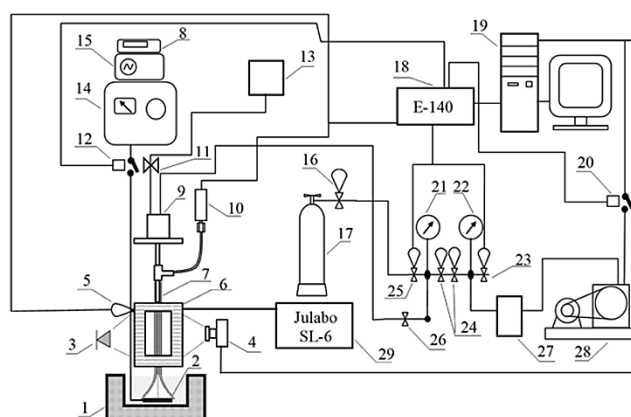
Заполнение экспериментальной ячейки 7 и разделительного устройства 9 происходит через разделительную емкость 13 путем подачи н-пентана под атмосферным давлением при помощи вентиля 11. Разделительное устройство представляет собой цилиндрический сосуд с сифоном. Основу системы заполнения составляют гидрозатвор, вакуумметр 22, маслоуловитель 27 и форвакуумный насос 28. Перед заполнением оба сосуда (разделительное устройство и экспериментальная ячейка) многократно откачиваются насосом 28 и заполняются парами н-пентана.

Давление в исследуемой системе создается с помощью углекислого газа, находящегося в баллоне 17. Оно понижается редуктором 16 до необходимой величины и воздействует на сифон разделительного устройства 9 через систему нормально закрытых электромагнитных клапанов 23–25 и вентиль 26. Сброс давления на исследуемую жидкость до атмосферного значения производится с помощью той же системы клапанов. Давление в системе измеряется датчиком давления типа Агава 10 и манометром 21 с точностью 0.01 МПа. Форвакуумный насос 28 позволяет создавать давление ниже атмосферного.

Установка работает в автоматическом режиме по заданной программе под управлением персонального компьютера 19 через аналого-цифровой преобразователь E-140 (18). Процесс вскипания фиксируется скоростной видеокамерой Fastvideo-250 (4). Для определения момента вскипания исследуемой жидкости используется программный модуль, управляющий видеопотоком со скоростной видеокамеры и измеряющий оптическую плотность изображения термостатируемой части ячейки 6. Время ожидания вскипания измеряется автоматически с момента установления равновесного давления в ячейке. Сигналом на остановку отсчета времени служит импульс давления, возникающий при вскипании, а также скачкообразное изменение оптической плотности изображения рабочей области ячейки. Точность измерения времени составляет 0.05 с.

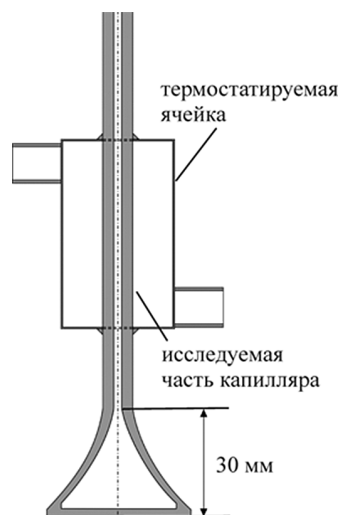
## Результаты и их обсуждения

Измерены времена жизни перегретого н-пентана при атмосферном давлении и температу-

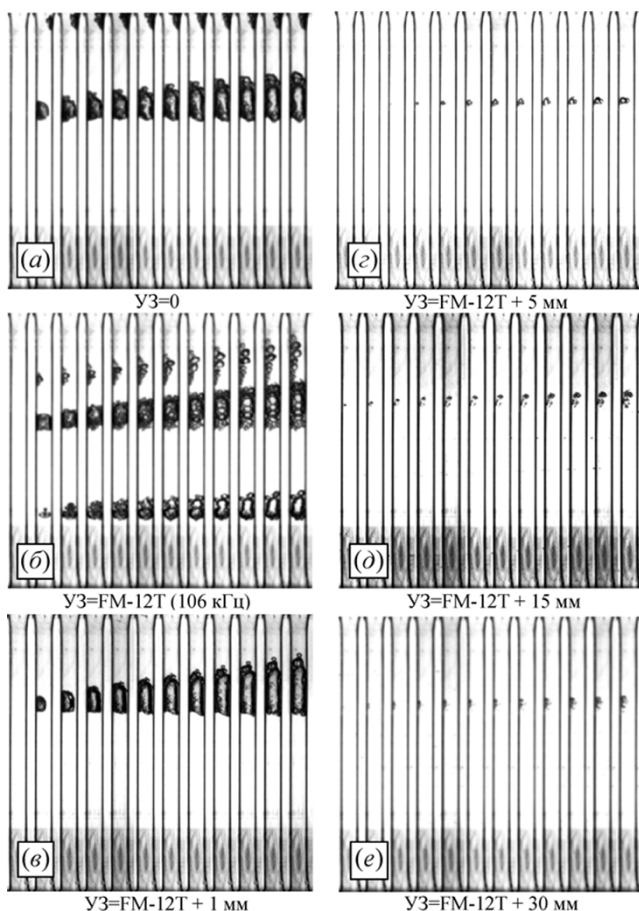


**Рис. 1.** Блок-схема экспериментальной установки: 1 – ультразвуковая ванна; 2 – пьезоизлучатель FM-12Т; 3 – светодиодный осветитель; 4 – видеокамера Fastvideo-250; 5 – медь-константановые термопары; 6 – термостатируемая ячейка; 7 – измерительная ячейка; 8 – вольтметр; 9 – разделительное устройство; 10 – датчик давления типа Агава; 11 – запорный вентиль; 12 – выключатель ультразвука; 13 – разделительная емкость; 14 – генератор ультразвука; 15 – осциллограф; 16 – редуктор; 17 – баллон с  $\text{CO}_2$ ; 18 – АЦП; 19 – компьютер; 20 – пускатель вакуумного насоса; 21 – манометр; 22 – вакуумметр; 23, 24, 25 – электромагнитные клапана; 26 – вентиль; 27 – маслоуловитель; 28 – форвакуумный насос; 29 – термостат Julabo SL-6

рах 100–130 °С с фиксацией процесса вскипания на скоростную видеокамеру с частотой 2600 кадров в секунду. Температура насыщенных паров н-пентана при атмосферном давлении составляет 36.1 °С. Опыты проведены до и после воздействия ультразвуковым полем от пьезоизлучателя FM-12Т с погружением нижней конусообразной части капилляра на разную глубину в ультразвуковую ванну (1, 5, 15, 30 мм), а также без погружения. Резонансная частота ячейки соответствует частоте пьезоизлучателя 106 кГц.



**Рис. 2.** Изображение измерительной ячейки



**Рис. 3.** Выборочные кадры видеосъемки начала вскипания н-пентана в измерительной ячейке при атмосферном давлении и температуре 130 °С (скорость видеосъемки 2600 к/с, время между кадрами 1540 мкс) под воздействием ультразвука от пьезоизлучателя FM-12Т с частотой  $f_1$  и ультразвуковой ванны с частотой  $f_2$  при разной глубине погружения  $h$ : (а) без ультразвука; (б)–(е) с ультразвуком; (б)  $f_1 \approx 106$  кГц,  $f_2 = 0$  кГц,  $h = 0$  мм; (в)–(е)  $f_1 \approx 106$  кГц,  $f_2 = 44$  кГц; (в)  $h = 1$  мм, (г)  $h = 5$  мм, (д)  $h = 15$  мм, (е)  $h = 30$  мм

На рис. 3 показаны типичные картины вскипания перегретого н-пентана при температуре 130 °С на одном и том же активационном центре кипения в разных условиях. На рис. 3, а рост пузырька на стенке капилляра происходит без

**Времена ожидания вскипания перегретого н-пентана  $\tau$  на одном и том же центре кипения при атмосферном давлении и температуре 130 °С под воздействием ультразвукового поля от пьезоизлучателя FM-12Т ( $f_1 \approx 106$  кГц) и ультразвуковой ванны ( $f_2 = 44$  кГц) при разной глубине погружения  $h$**

Параметр	Времена ожидания вскипания					
	в естественных условиях	под действием ультразвука				
$h$ , мм	0	0	1	5	15	30
$\tau$ , с	9.047	4.906	1.313	0.210	0.076	0.000

каких-либо внешних акустических воздействий ( $f_1 = 0$  кГц,  $f_2 = 0$  кГц). На рис. 3, б видно, как под действием резонансной частоты ультразвуковых колебаний только от пьезоизлучателя FM-12Т ( $f_1 = 106$  кГц,  $f_2 = 0$  кГц) на межфазной поверхности растущего пузырька образуется множество вторичных пузырьков. Рис. 3, в–е относятся к опытам с погружением в ультразвуковую ванну при одновременном воздействии ультразвука от пьезоизлучателя FM-12Т ( $f_1 \approx 106$  кГц,  $f_2 = 44$  кГц). Частота  $f_1$  близка к резонансной, но отличается от нее на 0.8–1.3 кГц. Из рис. 3, в следует, что небольшое погружение в ультразвуковую ванну на 1 мм не меняет картины вскипания по сравнению с «чистыми» условиями (см. рис. 3, а). Наиболее интересные результаты видеосъемки получены при относительно глубоком погружении нижней конусообразной части капилляра в ультразвуковую ванну. Рис. 3, д–е демонстрируют резкое уменьшение скорости роста пузырьков на стеклянной поверхности капилляра с увеличением глубины погружения, а также формирование «протуберанцев» на межфазной поверхности жидкость–пар.

В таблице приведены времена ожидания вскипания перегретого н-пентана  $\tau$  на одном и том же центре кипения (см. рис. 3) в разных условиях.

Из нее следует, что при воздействии ультразвукового поля значения  $\tau$  снижаются, причем наиболее резко, вплоть до нуля, это происходит с увеличением глубины погружения в ультразвуковую ванну ( $f_1 \approx 106$  кГц,  $f_2 = 44$  кГц). Средние времена жизни перегретого н-пентана в измерительной ячейке демонстрируют ту же тенденцию, но под влиянием ультразвукового поля плохо воспроизводятся, особенно при малых значениях. Количество активных центров кипения в ультразвуковом поле также снижается. Подобная картина наблюдалась в работе [15] при вскипании перегретой воды и водных растворов под воздействием ультразвука. Причиной может быть звукокапиллярный эффект, согласно которому ультразвук способствует аномально глубокому проникновению жидкости в капилляры и узкие щели [16]. При этом, видимо, происходит дегазация «слабых» мест поверхности, контактирующей с перегретой жидкостью, и, как следствие, образование и рост пристеночного пузырька за счет направленной диффузии газа [17]. Возможно также влияние других физико-химических эффектов воздействия ультразвука на исследуемую систему [1].

Ультразвуковые поля двух разных частот, отличающихся на 1–2 порядка ( $f_1 = 1$  МГц и  $f_2 = 22–44$  кГц), использовались в [18]. Авторы исследовали влияние этих полей на протекающие такие технологические процессы как кавитационное разрушение фольги, ультразвуковая очистка поверхности, эмульгирование масла, керосина и трибутилфосфата в воде. Наблюдалось заметное повышение интенсивности кавитации, которое не может быть объяснено линейным суммированием проявления каждого из полей в отдельности. Обнаруженный эффект достигается наличием двух различных резонансных радиусов при высоких и низких частотах [1, 18]. Низкие частоты увеличивают средний радиус кавитационных пузырьков, а высокие частоты – их стационарную концентрацию. Такое объяснение, предложенное в [1], согласуется с результатами, полученными нами. По всей видимости, при воздействии ультразвука только от пьезоизлучателя FM-12Т ( $f_1 = 106$  кГц,  $f_2 = 0$  кГц) растет количество центров зародышеобразования, время жизни перегретой жидкости снижается. При дополнительном погружении конусообразной части измерительной ячейки в ультразвуковую ванну ( $f_1 \approx 106$  кГц,  $f_2 = 44$  кГц) с увеличением глубины растет средний радиус парогазовых пузырьков. Как только этот размер окажется близок к критическому или даже его превысит, произойдет резкое снижение времени ожидания вскипания перегретой жидкости вплоть до нуля.

### Заключение

Измерены времена ожидания вскипания перегретого n-пентана под воздействием ультразвука от пьезоизлучателя и звуковой ванны при атмосферном давлении и температурах 100–130 °С. Показано, что с приближением частоты ультразвуковых колебаний к резонансной частоте ячейки время жизни перегретой жидкости уменьшается и при определенных условиях может быть доведено до нуля. Наиболее эффективным оказывается погружение конусообразной части капилляра с исследуемой жидкостью в звуковую ванну при одновременном воздействии пьезоизлучателя. Предполагается, что низкая частота ультразвукового поля от ультразвуковой ванны ( $f_2 = 44$  кГц) увеличивает средний радиус парогазовых пузырьков, а высокие частоты от пьезоизлучателя, близкие к резонансным ( $f_1 \approx 106$  кГц),

их стационарную концентрацию. С помощью скоростной видеосъемки процесса вскипания показано, что при воздействии ультразвука только высокой частоты на межфазной поверхности растущего пузырька образуется множество вторичных пузырьков. Дополнительное погружение капилляра в ультразвуковую ванну с увеличением глубины приводит к резкому снижению скорости роста пузырька, появляются «протуберанцы» на межфазной поверхности жидкость–пар.

Проведенная работа показывает, что при весьма незначительных затратах энергии за счет одновременного воздействия ультразвуковых полей двух разных частот можно заметно снизить время ожидания вскипания вплоть до нуля.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Маргулис М. А.** Основы звукохимии. Химические реакции в акустических полях. М.: Высшая школа, 1984. 272 с.
2. **Акуличев В. А.** Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. М.: Наука, 1978. 278 с.
3. **Байдаков В. Г.** Перегрев криогенных жидкостей. Екатеринбург: УрО РАН, 1995. 264 с.
4. **Ермаков Г. В.** Термодинамические свойства и кинетика вскипания перегретых жидкостей. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 270 с.
5. **Arfel R. E.** Acoustically induced explosions of superheated droplets // J. Acoust. Soc. Am. 1975. V. 57. N 6. Part 1. P. 1371–1373.
6. **Хиджиката Л., Мори И., Нагатани Т.** Экспериментальное исследование зародышеобразования пузырьков жидкости с периодически изменяющимся давлением // Теплопередача. 1978. Т. 100. № 3. С. 83–90.
7. **Байдаков В. Г., Каверин А. М., Скрипов В. П.** Акустическая кавитация и скорость ультразвука в перегретом жидком ксеноне // Тез. доклада IX Всесоюзной акустической конференции. Секция Б. Москва. 1977. С. 87–90.
8. **Байдаков В. Г., Каверин А. М., Скрипов В. П.** Акустическая кавитация в перегретой жидкости // Акустический журнал. 1981. Т. 27. № 5. С. 697–703.
9. **Ермаков Г. В., Фёдоров А. П.** А. с. 945776 (СССР). Способ контроля устойчивости перегретой жидкости. Б. И. 1982. № 27.
10. **Скрипов В. П., Синицын Е. Н.** Кинетика вскипания перегретого n-пентана // ЖФХ. 1968. Т. 42. С. 844.
11. **Скрипов В. П., Синицын Е. Н., Павлов П. А., Ермаков Г. В.** и др. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. М.: Атомиздат, 1980. 208 с.
12. **Lipnyagov E. V., Parshakova M. A., Perminov S. A., Ermakov G. V.** The visualization of boiling-up onset of superheated n-pentane in a glass capillary at atmospheric pressure by high-speed video // Int. J. Heat and Mass Trans. 2013. V. 60. N 1. P. 612–615.
13. **Липнягов Е. В., Перминов С. А., Паршакова М. А., Захаров М. С.** Визуализация вскипания сильно перегретого n пентана в стеклянном капилляре при давлениях выше атмосферного // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 5. С. 199–203.

14. **Lipnyagov E. V., Parshakova M. A., Perminov S. A.** The study of boiling-up onset of highly superheated n-pentane in a glass capillary at different pressures with the use of high-speed video. I. Visualization and nucleation sites // *Int. J. Heat and Mass Trans.* 2017. V. 104. N 1. P. 1353–1361.
15. **Перминов С. А., Ермаков Г. В.** Вскипание перегретой воды и водных растворов под действием ультразвука // *Теплофизика и аэромеханика*. 2010. Т. 17. № 1. С. 119–125.
16. **Агранат Б. А.** Основы физики и техники ультразвука. М: Высшая школа, 1987. 352 с.
17. **Hsieh D. Y., Plesset M. S.** Theory of rectified diffusion of mass into gas bubbles // *J. Acoust. Soc. America*. 1961. V. 33. N 2. P. 206–215.
18. **Хавский Н. Н.** Технологический эффект одновременного воздействия ультразвуковых колебаний различных частот в жидкостях // *Акустический журнал*. 1979. Т. 25. Вып. 1. С. 119–123.

## Acoustic fields effect study on the lifetime of overheated n-pentane

**E. V. Lipnyagov, S. A. Perminov, M. A. Parshakova**

*Institute of Thermal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg  
e-mail: parmari@yandex.ru*

The effect of ultrasound on the lifetime of overheated n-pentane in a glass capillary at atmospheric pressure and temperatures from 100 to 130 °C (overheating from 63.9 to 93.9 °C) was studied. The study was performed by the method of the lifetimes of overheated liquid measuring, according to which the overheating is attained by pressure dump on the thermostatically controlled liquid. The boiling-up process was recorded by the high-speed shooting. The glass capillary has an internal diameter of 2.45 mm and a cone-shaped expansion 30 mm high. The FM-12T ceramic plate of 12 mm diameter is glued to the cone-shaped capillary butt end. The plate oscillations were excited by the GZ-33 generator, allowing change the sound waves frequency from 9 to 106 kHz. The additional impact of the ultrasonic field on the liquid under study was provided by immersing the capillary lower conical part to various depths of the ultrasonic bath (1, 5, 15, 30 mm).

The conducted tests demonstrated that the lifetime of the overheated liquid decreased as ultrasonic oscillations frequency approached the resonance frequency of the cell, and under certain conditions, it can be brought to zero. Immersion of the conical part of the capillary, containing liquid, into the sonic bath with a simultaneous action of the piezo-radiator appeared to be most effective. The authors suppose that the acoustic field low frequency from the ultrasound bath (44 kHz) increases the average radius of gas-vapor bubbles, while high frequencies from the piezo-radiator, close to resonant frequencies ( $\approx 106$  kHz) increase their stationary concentration. It follows from video shooting data that on the impact of the ultrasound of high frequency only (106 kHz), a great number of secondary bubbles is being formed on the interphase surface of the growing bubble. An additional immersion of the capillary into the ultrasonic bath with depth increase leads to a sharp decrease in the bubble growth rate and “protuberances” occurrence on the liquid-vapor interphase surface.

Keywords: nucleation, overheat, boiling-up, ultrasound, n-pentane, high-speed video.

### REFERENCES

1. **Margulis M. A.** *Osnovy zvukokhimii. Khimicheskie reaktsii v akusticheskikh polyakh* [Fundamentals of sound chemistry. Chemical reactions in acoustic fields]. Moscow: High School Press, 1984. 272 p. In Russ.
2. **Akulichev V. A.** *Kavitatsiya v kriogennykh i kipyashihkh zhidkostyakh* [Cavitation in cryogenic and boiling liquids]. Moscow: Nauka, 1978. 278 p. In Russ.
3. **Baidakov V. G.** *Explosive Boiling of Superheated Cryogenic Liquids*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007. 352 p.
4. **Ermakov G. V.** *Termodinamicheskie svoystva i kinetika vskipaniya peregretykh zhidkostey* [Thermodynamic properties and boiling-up kinetics of superheated liquid]. UB RAS, Yekaterinburg, 2002. 270 p. In Russ.
5. **Apfel R. E.** Acoustically induced explosions of superheated droplets. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1975, vol. 57, no. 6, Part 1, pp. 1371–1373. DOI:10.1121/1.380622
6. **Hijikata K., Mori Y., Nagatani T.** Experimental study on bubble nucleation in the oscillating pressure field. *J. Heat Transfer*, 1978, vol. 100, no. 3, pp. 460–465. DOI:10.1115/1.3450831
7. **Baidakov V. G., Kaverin A. M., Skripov V. P.** Akusticheskaya kavitatsiya i skorost' ul'trazvuka v peregretoy zhidkosti ksenona [Acoustic cavitation and ultrasonic velocity in superheated liquid xenon]. *Theses of the report of the 9th All-Union Acoustic Conference. Section B*. Moscow, 1977. pp. 87–90. In Russ.
8. **Baidakov V. G., Kaverin A. M., Skripov V. P.** Akusticheskaya kavitatsiya v peregretoj zhidkosti [Acoustic cavitation in a superheated liquid]. *Akusticheskij zhurnal – Acoustic magazine*, 1981, vol. 27, no. 5, pp. 697–703. In Russ.
9. **Ermakov G. V., Fedorov A. P.** *Sposob kontrolya ustoychivosti peregretoj zhidkosti*. A. s. № 945776 (SSSR) [Method for controlling the stability of superheated

- liquid. Author's certificate № 945776 (USSR)]. *Byulleten' izobretenij – Bulletin of inventions*, 1982, no. 27. In Russ.
10. **Skripov V. P., Sinitsyn E. N.** Kinetika vskipaniya peregretoogo n-pentana [The kinetics of boiling-up of superheated n-pentane]. *Zhurnal fizicheskoy khimii – Journal of Physical Chemistry*, 1968, vol. 42, p. 844. In Russ.
  11. **Skripov V. P., Sinitsyn E. N., Pavlov P. A., Ermakov G. V., Muratov G. N., Bulanov N. V., Baidakov V. G.** *Thermophysical Properties of Liquids in the Metastable (Superheated) State*. Gordon and Breach Science Publishers, London, 1988.
  12. **Lipnyagov E. V., Parshakova M. A., Perminov S. A., Ermakov G. V.** The visualization of boiling-up onset of superheated n-pentane in a glass capillary at atmospheric pressure by high-speed video. *Int. J. Heat and Mass Trans.*, 2013, vol. 60, no. 1, pp. 612–615. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.022
  13. **Lipnyagov E. V., Perminov S. A., Parshakova M. A., Zakharov M. S.** Vizualizatsiya vskipaniya sil'no peregretoogo n-pentana v steklyannom kapillyare pri davleniyakh vyshe atmosfernogo [Visualization of boiling-up onset of highly superheated n-pentane in a glass capillary at positive pressures]. *Teplovye protsessy v tekhnike – Thermal processes in engineering*, 2015, vol. 7, no. 5, pp. 199–203. In Russ.
  14. **Lipnyagov E. V., Parshakova M. A., Perminov S. A.** The study of boiling-up onset of highly superheated n-pentane in a glass capillary at different pressures with the use of high-speed video. I. Visualization and nucleation sites. *Int. J. Heat and Mass Trans.*, 2017, vol. 104, no. 1, pp. 1353–1361. DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.020
  15. **Perminov S. A., Ermakov G. V.** Boiling-up of superheated water and water solutions under ultrasound influence. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2010, vol. 17, no. 1, pp. 107–112. DOI:10.1134/S0869864310010129
  16. **Agranat B. A.** *Osnovy fiziki i tekhniki ul'trazvuka* [Fundamentals of physics and engineering of ultrasound]. Moscow: High school Press, 1987. 352 p. In Russ.
  17. **Hsieh D. Y., Plesset M. S.** Theory of rectified diffusion of mass into gas bubbles. *J. Acoust. Soc. America*, 1961, vol. 33, no. 2, pp. 206–215. DOI:10.1121/1.1908621
  18. **Khavsky N. N.** Tekhnologicheskij ehffekt odnovremennogo vozdeystviya ul'trazvukovykh kolebanij razlichnykh chastot v zhidkostyakh [Technological effect of simultaneous action of ultrasonic oscillations of various frequencies in liquids]. *Akusticheskij zhurnal – Acoustic magazine*, 1979, vol. 25, no. 1, pp. 119–123. In Russ.