

УДК 536.423

МУЛЬТИПОРоговый ХАРАКТЕР СПОНТАННОГО ГЕТЕРОГЕННОГО ВСПИКАНИЯ ПЕРЕГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ В СТЕКЛЯННОЙ ТРУБКЕ

© 2024 г. М. А. Паршакова¹, *, Е. В. Липнягов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Институт теплофизики Уральского отделения Российской академии наук», Екатеринбург, Россия

*E-mail: parmari@yandex.ru

Поступила в редакцию 02.05.2024

После доработки 13.05.2024

Принята к публикации 31.05.2024

Представлен цикл экспериментальных исследований кинетики спонтанного гетерогенного вскипания перегретого *n*-пентана в двух стеклянных трубках. Установлено, что изобарические температурные зависимости среднего времени жизни перегретой жидкости, полученные в схожих условиях, имеют пороговые значения при температурах 100–115, 120–125 и 130–140 °С.

Ключевые слова: вскипание, перегрев, гетерогенное зародышеобразование, *n*-пентан

DOI: 10.31857/S0367676524090099, EDN: ODSAJO

ВВЕДЕНИЕ

Нарушение герметичности реакторов, сосудов высокого давления, трубопроводов, содержащих перегретую жидкость, приводит к быстрому снижению давления жидкости ниже давления насыщенных паров p_s . В итоге жидкость может оказаться перегретой (метастабильной) и вскипеть. При глубоких заходах в область метастабильных состояний процесс фазового распада протекает взрывообразно, что часто приводит к аварийной ситуации [1–6].

В текущей статье представлены экспериментальные данные по изучению кинетики спонтанного гетерогенного вскипания перегретого *n*-пентана в стеклянных трубках с разной областью термостатирования. Использованы две вертикально ориентированные трубки из одной партии с верхним (трубка 1) и нижним (трубка 2) запаянным концом. Внутренний диаметр трубок $D = 5.6$ мм, внешний диаметр – 10 мм. Исследования проведены методом чистой пузырьковой камеры [1, 3] на двух независимых экспериментальных установках, имеющих единый блок создания давления. Установки оборудованы скоростными видеокамерами и быстрой кинетики и динамики спонтанного вскипания перегретых жидкостей. Результаты опытов с трубкой 1 опубликованы ранее в цикле статей [7–12]. Результаты опытов с трубкой 2 являются новыми.

Разное расположение запаянного конца трубки имеет свои особенности. В трубках с запаянным низом интенсивнее конвекция. В трубках

с запаянным верхом затруднена дегазация исследуемой жидкости. Это может повлиять на механизмы гетерогенной нуклеации в таких системах.

В работе [7] изучено влияние малых добавок пара CO_2 (<1.5% моль) на кинетику вскипания перегретого *n*-пентана. Установлено, что малые добавки легкокипящей примеси способствуют приработке наиболее активных центров парообразования. В работах [9, 12] сделано предположение, что природа таких центров связана с метастабильной ликвацией молибденового стекла. В пользу этого свидетельствуют результаты исследования кинетики вскипания перегретой жидкости (*n*-пентан, *n*-гексан) при атмосферном давлении в стеклянных трубках ($D = 1.0$ мм), силилированных при помощи триалкилхлорсиланов (R_3ClSi , где R – органический радикал CH_3) [13–15]. Такое покрытие повышает сродство предельных углеводородов со стеклом, а значит и смачиваемость стеклянной поверхности исследуемой жидкостью. Группы SiR_3 , привитые к стеклу, позволяют достичь наиболее высоких средних времен жизни перегретого состояния при заданных условиях перегрева без предварительной «приработки» поверхности. Затем после серии опытов ситуация резко изменяется. Алкилсилильное покрытие разрушается, а температура перегрева резко снижается (от 146.4 до 130.0 °С для *n*-пентана). В этом случае разрушенные структуры проявляют себя как дефекты поверхности.

Рассматривалось вскипание жидкостей на искусственных флуктуационных центрах кипения [16]. Выявлены две группы центров. Одни центры

снижают температуру перегрева на несколько градусов и поддаются разрушению. Другие центры снижают эту величину на несколько десятков градусов и сохраняют активность. При этом граница экспериментально достижимого перегрева проявляется очень резко, а в некоторых случаях характеризуется гистерезисом.

В работах [11, 12] установлено, что при атмосферном давлении в диапазоне температур 120.0–130.0 °C наблюдается взрывной рост парового пузыря, развитие неустойчивости по типу «вязких пальцев». Эти структуры являются предвестниками третьего кризиса кипения, наступающего при температуре ~130.0 °C. Он заключается в переходе от однофазной конвекции в жидкости к пленочному кипению, минуя пузырьковый режим кипения [17].

Структуры с «вязкими пальцами» относят к фракталам, т.е. самоподобным объектам. Их образование описывается в теории перколяции (просачивания) как геометрический фазовый переход [18]. Он тесно связан с фазовым переходом 2-го рода. Теория перколяции привлекалась в работах [19, 20] для объяснения «аномального» вскипания перегретой воды в чистой пузырьковой камере, т.е. расхождения по температуре в несколько десятков градусов между теоретическим (гомогенным) расчетом границы достижимого перегрева и экспериментом.

Подавляющее количество данных по кинетике вскипания перегретых жидкостей получено при высоких перегревах (в диапазоне 20–25 °C вблизи теоретической границы достижимого перегрева) и слабых перегревах (вблизи линии насыщения).

Механизмы действия гетерогенных флуктуационных центров кипения при умеренных заходах в область метастабильных состояний остаются малоизученными. Цель настоящей работы заключается во всестороннем исследовании таких центров кипения.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Наиболее высокие перегревы в цикле экспериментальных исследований [7–12] достигнуты в измерительной ячейке, в которой термостатирована середина трубки 1 с запаянным верхом [11]. Это определило конструктивные особенности новой ячейки, фотография которой показана на рис. 1б. В представленной ячейке термостатирована середина трубки 2 с нижним запаянным концом. Высота термостатирующей области H_0 составляет 105 мм, её объем $V_0 = 2.6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$. Верхняя и нижняя части трубки находятся при комнатной температуре. Их высоты равны 130 и 45 мм соответственно. В начале вскипания фронт испарения движется, как правило, в сторону, противоположную от запаянного конца трубки [7–12, 21].

Представленная конструкция напоминает гладкостенную тепловую трубу (сильфон), в которой жидкость испаряется в горячем конце трубы, поглощая теплоту испарения, и конденсируется в холодном конце, откуда под действием силы тяжести перемещается обратно в горячий конец [22]. Значительная часть холодной жидкости, расположенная сверху термостатированной части, может

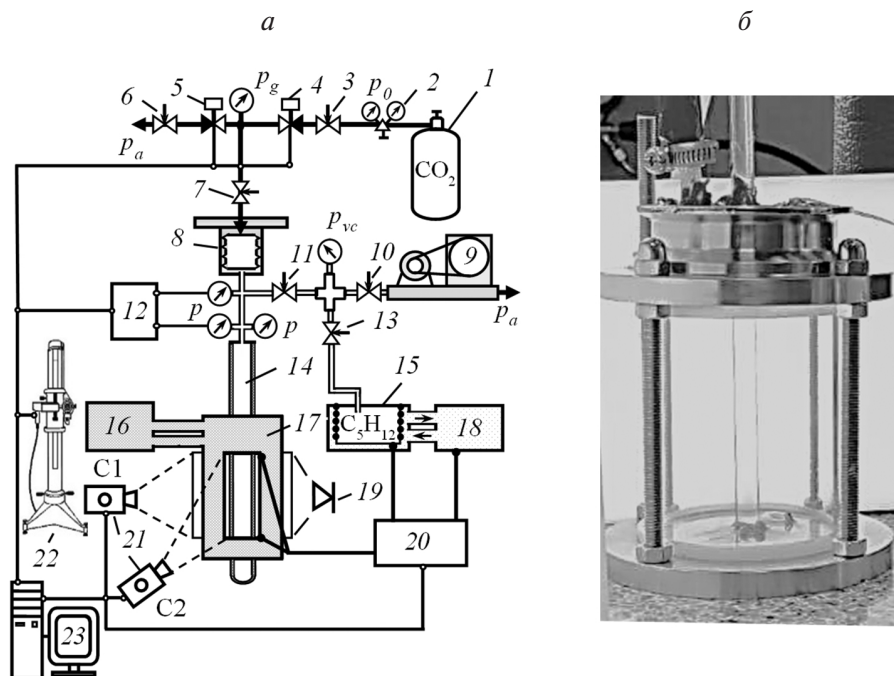


Рис. 1. Блок-схема новой экспериментальной установки (а) и фотография термостатирующей ячейки с теплоносителем (ПМС-20) и стеклянной трубкой (б).

повлиять на начало кризиса кипения 2-го рода, который связывается с разрушением жидкой пленки при переходе от дисперсно-кольцевого режима течения к дисперсному режиму. Характерной величиной для этого кризиса является граничное расходное паросодержание [17].

Новое расположение трубки 2 потребовало создание новой экспериментальной установки, блок-схема которой представлена на рис. 1а. Перед измерениями исследуемая жидкость (*n*-пентан) дегазируется. С этой целью *n*-пентан помещается в резервуар 15, соединенный посредством трубок и вентиля 13 с системой заполнения и дегазации 9–11, блоком управления давления 12 и стеклянной трубкой 14. Резервуар 15 подключен к криостату 18 для охлаждения и снабжен нагревательными элементами для возврата к комнатной температуре. Дегазация как исследуемой жидкости, так и всех элементов установки, соединенных с резервуаром 15 при комнатной температуре, происходит с помощью охлаждения резервуара до $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и последующего вакуумирования до -0.095 МПа (относительно атмосферы) форвакуумным насосом 9. Контроль вакуумирования ($p_{\text{вк}}$) осуществляется датчиком давления – разряжения типа СДВ STANDARD. Точность измерения давления $\pm 0.01\text{ МПа}$. Затем резервуар 15 с *n*-пентаном отсекается вентилем 13 от системы заполнения и дегазации, нагревается до комнатной температуры и повторно соединяется с вакуумированными элементами установки после их отсечения вентилем 10 от форвакуумного насоса 9. Заполнение трубки 14 парами дегазированного *n*-пентана с последующей их конденсацией происходит за счет разницы давлений в резервуаре 15 и трубке 14. По завершении этого процесса измерительная часть установки (чистая пузырьковая камера) отсекается вентилем 11 от системы заполнения и дегазации.

Чистая пузырьковая камера представляет собой устройство, в котором исследуемая жидкость, находящаяся в термостатируемой стеклянной трубке 14, переводится в метастабильное (перегретое) состояние посредством сброса давления. Средняя (рабочая) часть трубки 14 термостатируется в ячейке 17 с теплоносителем (полиметилсилоксаном ПМС-20) от циркуляционного термостата Julabo SL-6 16. Температура T в рабочей части трубки 14 контролируется многоканальным прецизионным измерителем температур МИТ-8 20 при помощи двух платиновых термометров сопротивления (Pt1000), помещенных на входе и выходе теплоносителя в термостатирующей ячейке 17. Точность поддержания температуры T в ячейке 17 составляет $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Две скоростные видеокамеры 21 (HuaTengVision HT-SUA133GC-T (C1, 600 к/с) и Sony DSC-RX0M2 (C2, 1000 к/с)) предназначены для видеосъемки процесса вскипания в двух взаимно перпендикулярных проекциях. Для измерения вертикальных отрезков используется катетометр КМ-6 22, оборудованный цифровой видеокамерой А4ТЕСН РК-836МЖ.

Экспериментальная установка работает автоматически по заданной программе под управлением высокопроизводительной вычислительной станции 23 через систему контроля давления 12 и нормально закрытые электромагнитные клапана 4, 5. Запорные краны 3, 6 предназначены для регулировки скорости изменения давления в системе. Вентиль 7 позволяет полностью отсечь чистую пузырьковую камеру от системы создания давления 1–6.

Давление в системе создается при помощи баллона с сжатым газом (двуокисью углерода) 1 и редуктора 2 с выходным давлением p_0 , передается на жидкость через разделительный сиффон 8 и контролируется двумя датчиками давления типа СДВ STANDARD (частота измерений 5 Гц), помещенными в жидкую (p) и газовую фазу (p_g), а также быстроедействующим датчиком давления Sendo Sensor SS312 (500–2000 Гц), помещенным в жидкую фазу (p) через модуль АЦП-ЦАП LCard E-140.

В начале опыта *n*-пентан находится в стабильном состоянии под давлением $p_0 = 1.5\text{--}2.0\text{ МПа}$. Перегрев достигается понижением давления p до атмосферного значения p_a ниже давления насыщенных паров p_s при фиксированной температуре T теплоносителя в ячейке 17. Сброс давления приводит к релаксационным процессам в исследуемой жидкости. Выход на равновесие фиксируется датчиками давления. В этот момент начинается отсчет времени жизни перегретого состояния τ . Релаксация давления жидкости к p_a происходит быстрее релаксации температуры перегретого *n*-пентана к температуре T . Это зависит от внутреннего диаметра и толщины стенки стеклянной трубки 14. Однако максимальное охлаждение жидкости из-за понижения давления не превышает $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ [8]. Момент вскипания определяется по импульсу давления, возникающему при вскипании, а также по скачкообразному изменению оптической плотности изображения измеряемой ячейки, регистрируемому камерами 21. Точность измерения времени составляет 0.05 с . После вскипания давление в системе повышается, но остается заметно ниже давления насыщенных паров p_s из-за более существенного влияния холодной части жидкости по сравнению с предыдущими опытами [7–12]. Через некоторое время жидкость автоматически возвращается в исходное состояние при помощи электромагнитных клапанов 4, 5.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На новой установке исследована кинетика вскипания перегретого *n*-пентана в стеклянной трубке 2 с запаянным низом методами непрерывного понижения давления (в диапазоне температур $93.8\text{--}122.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) и измерения времен жизни перегретой жидкости ($88.9\text{--}122.5\text{ }^{\circ}\text{C}$). В первом случае измерены температура T и давление p' , при которых жидкость вскипает, во втором – температура и время

жизни перегретой жидкости τ при установившемся атмосферном давлении $p_a = 0.10$ МПа. Статистическая обработка данных типа времен жизни подробно описана в работе [23].

На рис. 2 представлена логарифмическая зависимость среднего времени жизни перегретого n -пентана $\bar{\tau}$ от температуры T при атмосферном давлении. Серии опытов 1 и 2 получены ранее с использованием трубки 1 с термостатированным верхом. Серии опытов 3–5 являются результатами этой работы. На рис. 2 также приведены литературные данные 6, полученные в трубке схожего диаметра (7.0 мм) [24]. Они практически совпадают с результатами наших исследований, выполненных в трубке 1 с термостатированной серединой [11]. В диапазоне температур 85.0–137.3 °C. На рис. 2 эти данные не показаны во избежание путаницы.

Для проведенных опытов характерен температурный гистерезис, который заключается в следующем.

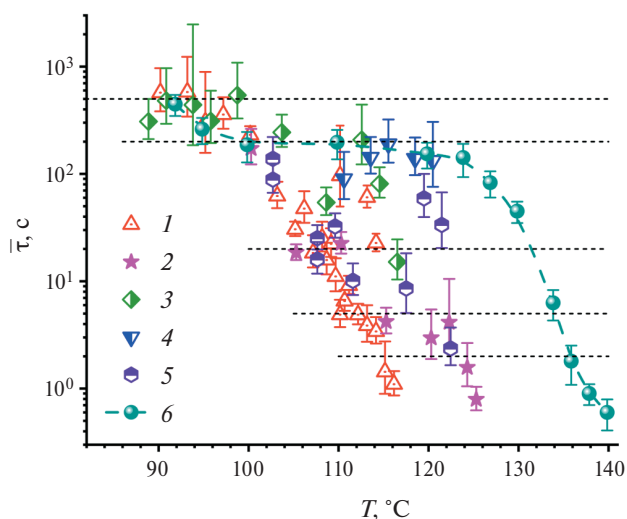


Рис. 2. Среднее время жизни перегретого n -пентана в зависимости от температуры при атмосферном давлении: 1–5 – эксперимент; 6 – данные [24], $D = 7$ мм, $V_0 = 2.7 \cdot 10^{-6}$ м³; 1–2 – термостатирована верхняя часть трубки 1, $D = 5.6$ мм, $V_0 = 2.8 \cdot 10^{-6}$ м³ [7–10, 12]; 3–5 – середина трубки 2, $D = 5.6$ мм, $V_0 = 2.6 \cdot 10^{-6}$ м³.

По достижении пороговой температуры перегрева полученные ранее результаты в её окрестности, не воспроизводятся. Для воспроизводимости изобразительной зависимости $\bar{\tau}(T)$ необходимо вернуться к более низким температурам, а затем уже повышать температуру опытов. Перезаполнение трубки исследуемой жидкостью, многократные вскипания («приработка», растворенный газ), скорость захода в метастабильную область, наличие видимых дефектов стекла также могут повлиять на средние значения τ .

В серии опытов 3 и 4 температура n -пентана последовательно повышалась, что типично для метода чистой пузырьковой камеры. В серии опытов 5 реализовано несколько хаотичных возвратов к более низким температурам. В ней достигнуты самые высокие перегревы. В диапазоне температур 119.5–122.5 °C значительная часть ожидаемых событий (вскипаний) происходила в процессе понижения давления. Спецификой этого диапазона температур при $p' = p_a$ является формирование гладкого пузыря, рост которого взрывообразно ускоряется с появлением вторичных пузырьков. Типичная картина такой смены режима парообразования детально показана в работе [12], но чаще всего она встречается в опытах по измерению времен жизни перегретого n -пентана в трубке 1 с термостатированной серединой [11].

Экспериментальные данные, представленные на рис. 2, образуют несколько «плато» и три выраженные границы достижимого перегрева при температурах 100–115 °C, 120–125 °C и 130–140 °C. На «плато» средние времена жизни перегретого состояния практически не зависят от давления и температуры исследуемой жидкости. Их принято объяснять воздействием фонового излучения. Уровни «плато» порядка 1000, 5, 2 с типичны для трубок малого диаметра [1, 3, 21, 25]. Уровень «плато» порядка 20 с наблюдался в опытах с n -пентаном и малыми добавками легкокипящей примеси [7]. На рис. 2 показаны уровни 500, 200, 20, 5 и 2 с. Пороговые значения температур могут быть связаны со сменой механизмов нуклеации (кризисами кипения). В сочетании с воздействием фонового излучения эти кризисы определяют сложный характер зависимости $\bar{\tau}(T)$. Пиковое возрастание средних времен жизни при приближении к пороговым значениям перегрева часто встречается в опытах, проводимых методом чистой пузырьковой камеры. Оно объясняется дополнительной приработкой поверхности, с которой контактирует исследуемая жидкость.

Пороговые значения температур коррелируют с температурами перегрева, при которых наблюдается смена режимов двухфазного потока вскипающего n -пентана [12]. В диапазоне температур 100–115 °C (см. серию опытов 2 на рис. 2) фазовая граница растущего пузыря со стороны запаянного конца трубки является малоподвижной. Появляются вторичные пузыри на поверхности первичного пузыря и/или в пристеночном слое жидкости. При этом линейная скорость фронта испарения перегретой жидкости может превышать пороговое значение 1 м/с. В диапазоне температур 120–125 °C возникают структуры наподобие «вязких» пальцев. Эта граница достижимого перегрева может быть связана с перколяционным порогом исследуемой системы. В диапазоне температур 130.0–137.3 °C возникает третий кризис кипения [11], который тоже носит пороговый характер.

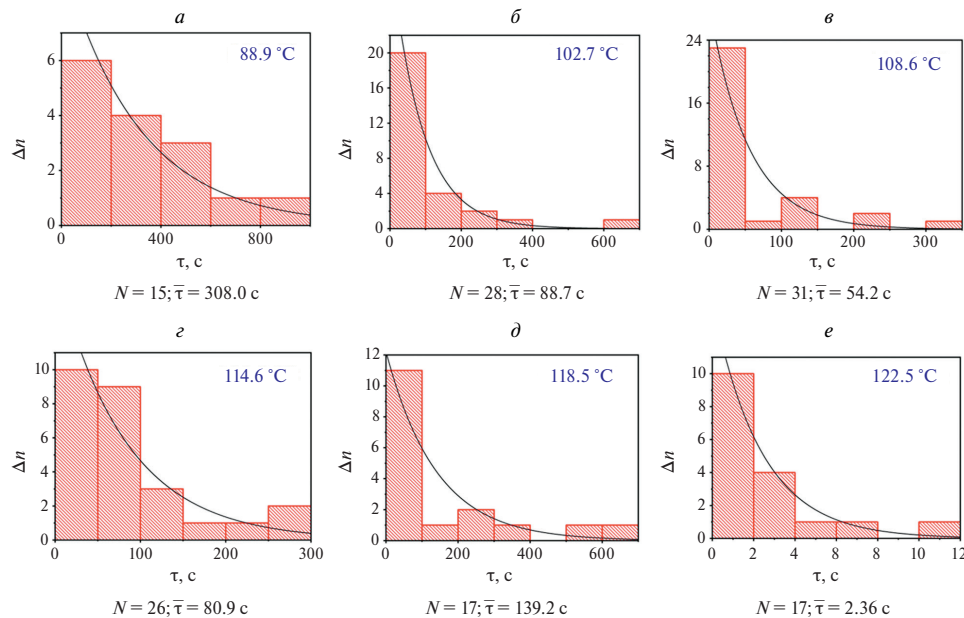


Рис. 3. Выборочные гистограммы распределения времени жизни перегретого *n*-пентана в стеклянной трубке ($D = 5.6$ мм, $V_0 = 2.6 \cdot 10^6$ м³) при различных температурах: сплошная линия – экспоненциальное распределение.

На рис. 3 представлены типичные гистограммы распределения времен жизни перегретого *n*-пентана в стеклянной трубке, полученные при атмосферном давлении и разных температурах, а также экспоненциальное распределение случайной величины τ . В ряде случаев (см. рис. 3б, в, д) наблюдается заметное отклонение от показательного распределения τ за счет преобладающего вскипания при малых временах жизни перегретого состояния. Подобные распределения хорошо описываются смесью экспоненциальных и нормальных распределений [8], что свидетельствует о действии нескольких конкурирующих механизмов парообразования.

Из данных высокоскоростных датчиков давления следует, что понижение избыточного давления на жидкость $\Delta p = p - p_a$ в интересующем нас диапазоне $0.115 \leq p \leq 1.10$ МПа можно аппроксимировать следующим образом:

$$\frac{\Delta p}{p_a} = \begin{cases} (p_0/p_a - 1) \exp(-k_1 t), & \text{если } 0 \leq t < t_1 \\ (e - 1) \exp(-\sqrt{2} k_1 (t - t_1)), & \text{если } t_1 \leq t \leq t_2 \\ (\sqrt{e} - 1) \exp(-2k_1 (t - t_2)), & \text{если } t > t_2 \end{cases}$$

$$t_1 = \frac{1}{k_1} \ln \left(\frac{p_0/p_a - 1}{e - 1} \right),$$

$$t_2 - t_1 = \frac{1}{k_1 \sqrt{2}} \ln \left(\frac{e - 1}{\sqrt{e} - 1} \right), \quad (1)$$

где $p_a = 0.983$ МПа, $p_0 \leq 1.10$ МПа – давление при $t = 0$, например $p_0 = p_s$. В рамках представленной

работы выполнена аппроксимация данных быстродействующих датчиков давления при помощи формул (1), полученных в двух трубках с термостатированной серединой. Точность аппроксимации с единственным подгоночным параметром k_1 по данным свыше 100 реализаций вскипания перегретого *n*-пентана при разных температурах составляет от ± 0.01 до ± 0.04 МПа. Чем хуже формулы (1) описывают точки изломов кривой зависимости $\Delta p(t)$,

$$p_{cr1} = e p_a, \quad p_{cr2} = \sqrt{e} \cdot p_a, \quad (2)$$

в полулогарифмических координатах, тем больше расхождение расчета и эксперимента. Смена режима понижения давления на жидкость связана с разными режимами истечения газа в атмосферу (критическим и докритическим), возникающими из-за локальных сопротивлений на газопроводе [9]. В серии опытов 3 (см. рис. 2) средние значения p' составляют 0.265 МПа, а в серии опытов 4, 5 – лежат в диапазоне давлений от 0.176 до 0.230 МПа с параметрами k_1 от 0.2 до 0.5 с⁻¹. Таким образом, вскипания при $p' > p_a$ в трубке 2 объясняются увеличением скорости понижения давления.

На рис. 4 представлены характерные картины вскипания, полученные в результате исследования кинетики вскипания перегретой жидкости в стеклянной трубке 2. В табл. 1 приведены параметры проведенных опытов. Результаты видеосъемки (1, 2) синхронизированы с зависимостями давления в жидкости (3, 4) и величины Δh (5, 6) от времени, где Δh – разность высот между верхней и нижней границей раздела фаз. Также на рис. 4 показаны

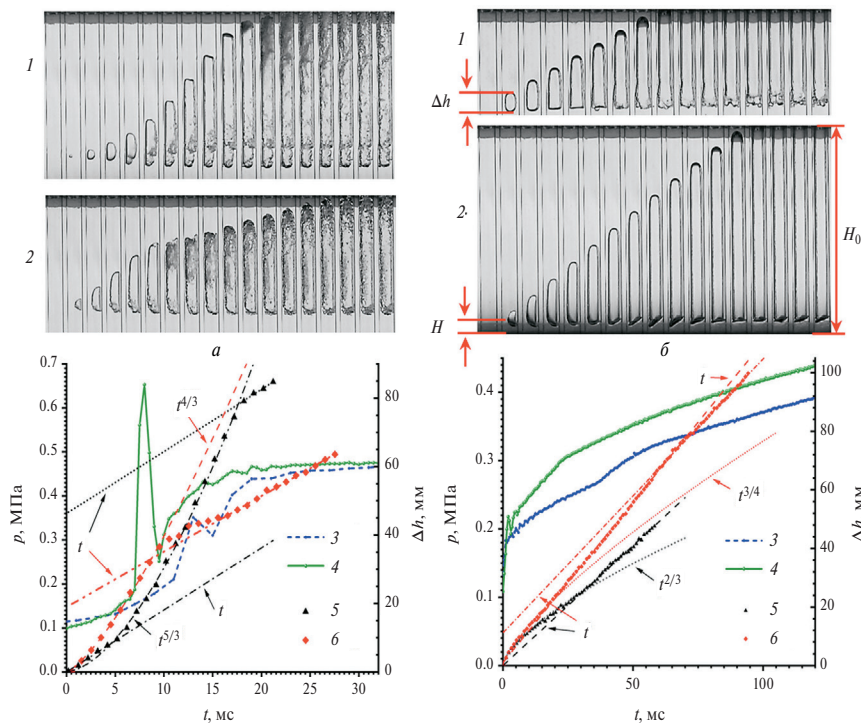


Рис. 4. Раскадровки начала вскипания перегретого *n*-пентана в стеклянной трубке (1, 2) (проекция С2), синхронизированные с данными датчика давления Sento Sensor SS312 (3, 4) и временными зависимостями разности высот Δh (5, 6): (а) быстрый рост паровой фазы; (б) медленный рост. Время между кадрами: (а) 1; (б) 8 мс. Параметры опытов и аппроксимаций некоторых участков зависимости $\Delta h(t)$ приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Параметры опытов, представленных на рис. 4

Номер	рис. 4	V_{SS} , Гц	T , °С	p_s , МПа	p' , МПа	τ , с	H , мм	k_1 , с ⁻¹
1	а (1, 3, 5)	500	107.6	0.700	0.10	5.03	26.1	0.392
2	а (2, 4, 6)	2000	111.6	0.763	0.10	9.38	45.4	0.415
3	б (1, 3, 5)	2000	110.6	0.747	0.10	299	58.7	0.337
4	б (2, 4, 6)	2000	119.5	0.898	0.10	13.7	5.7	0.399

Таблица 2. Параметры степенных аппроксимаций некоторых участков зависимости $\Delta h(t)$ для опытов, представленных на рис. 4.

Номер	$\Delta h = A_f \cdot t^n$		$\Delta h \sim V_f \cdot t$
	n	A_f , м/с ^{n}	V_f , м/с
1	5/3	65.6	1.81
2	4/3	18.4	1.84
3	2/3	0.257	0.82
4	3/4	0.431	1.09 (0.94)

аппроксимации для некоторых участков кривых (5, 6), параметры которых приведены в таблице 2. Фронт вскипания всегда распространяется вверх. Для горячей части трубки характерен эмульсионный (вспененный) режим кипения. В холодной её части происходит всплытие и последующая конденсация пузырьков пара, т.е. наблюдается пузырьковый режим кипения. В некоторых опытах в самом начале вскипания перегретой жидкости (см. рис. 4а) зафиксирован резкий скачок давления. Он является специфичным для текущего эксперимента. При одной и той же температуре встречается два режима вскипания: быстрый, показанный на рис. 4а, и медленный, показанный на рис. 4б.

Как и в работе [12], по новым видеоданным сделаны выборочные оценки линейной скорости распространения фронта вскипания V_f . Они, как правило, лежат между зависимостями $V_f/(p_s - p')$ $\sim 1.0\text{--}1.5$ м/(МПа·с) или вблизи постоянных значений 0.8 и 1.0 м/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе обсуждаются экспериментальные данные по изучению кинетики спонтанного вскипания перегретого *n*-пентана в стеклянных трубках с верхним (трубка 1) и нижним (трубка 2) запаянным концом и различной областью термостатирования. Опыты проведены на двух независимых установках методами непрерывного понижения давления (в диапазоне температур 88.9–137.3 °С) и измерения времени жизни (85.0–137.3 °С).

Сравнение изобарических температурных зависимостей среднего времени жизни перегретой жидкости, полученных в схожих условиях, показывает, что они частично воспроизводятся, образуют несколько «плато» и три выраженные границы достижимого перегрева при температурах 100–115 °С, 120–125 и 130–140 °С. Мультипороговый характер исследуемого процесса может быть обусловлен сменой режима гетерогенной нуклеации в таких системах (кризисах кипения). Механизмы фазового перехода на гетерогенных флуктуационных центрах могут быть связаны с формированием фракталов (самоподобных объектов). К ним, в частности, относятся структуры наподобие «вязких пальцев».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М: Наука, 1972. 312 с.
2. Blander M., Katz J.L. // AIChE Journal. 1975. V. 21. No. 5. P. 833.
3. Скрипов В.П., Сеницын Е.Н., Павлов П.А. и др. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. М: Атомиздат, 1980. 208 с.
4. Avedisian C.T. // J. Phys. Chem. Ref. Data. 1985. V. 14. No. 3. P. 695.
5. Debenedetti P.G. Metastable Liquids. Princeton: Princeton University Press, 1996. 424 p.
6. Ермаков Г.В. Термодинамические свойства и кинетика вскипания перегретых жидкостей. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 272 с.
7. Perminov S.A., Lipnyagov E.V., Parshakova M.A. // J. Phys. Conf. Ser. 2021. V. 2039. Art. No. 012027.
8. Паршакова М.А., Липнягов Е.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 2. С. 215; Parshakova M.A., Lipnyagov E.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 2. P. 158.
9. Липнягов Е.В., Паршакова М.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 2. С. 221; Lipnyagov E.V., Parshakova M.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 2. P. 164.
10. Lipnyagov E.V., Parshakova M.A. // Int. J. Heat Mass Trans. 2022. V. 196. Art. No. 123254.
11. Паршакова М.А., Липнягов Е.В. // Изв. РАН. Сер. физ. 2023. Т. 87. № 11. С. 1554; Parshakova M.A., Lipnyagov E.V. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2023. V. 87. No. 11. P. 1586.
12. Lipnyagov E.V., Parshakova M.A. // Int. J. Heat Mass Trans. 2024. V. 218. Art. No. 124811.
13. Lipnyagov E.V., Gurashkin A.L., Starostin A.A., Skripov P.V. // J. Eng. Thermophys. 2018. V. 27. No. 3. P. 307.
14. Ermakov G.V., Lipnyagov E.V., Perminov S.A., Gurashkin A.L. // J. Chem. Phys. 2009. V. 131. No. 3. Art. No. 031102.
15. Ермаков Г.В., Липнягов Е.В., Перминов С.А. // Теплофиз. и аэромех. 2012. Т. 19. № 6. С. 769; Ermakov G.V., Lipnyagov E.V., Perminov S.A. // Thermophys. Aeromech. 2012. V. 19. No. 4. P. 667.
16. Липнягов Е.В., Ермаков Г.В., Перминов С.А. // Труды РНКТ-3. Т. 1. М.: Изд-во МЭИ, 2002. С. 80.
17. Кутателадзе С.С., Накоряков В.Е. Тепло массообмен и волны в газожидкостных системах. Новосибирск: Наука, 1984. 301 с.
18. Смирнов Б.М. Физика фрактальных кластеров. М.: Наука, 1991. 133 с.
19. Chukanov V.N. // J. Chem. Phys. 1985. V. 83. No. 4. P. 1902.
20. Chukanov V.N., Korobitsyn B.A. // J. Eng. Thermophys. 2007. V. 16. No. 3. P. 192.
21. Lipnyagov E.V., Parshakova M.A., Perminov S.A. // Int. J. Heat Mass Trans. 2017. V. 104. P. 1353.
22. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы. М.: Энергия, 1979. 272 с.
23. Lipnyagov E.V., Parshakova M.A., Perminov S.A. // Int. J. Heat Mass Trans. 2017. V. 104. P. 1362.
24. Падерин И.М., Усков В.С., Ермаков Г.В. // ТБТ. 1994. Т. 34. № 6. С. 863; Paderin I.M., Uskov V.S., Ermakov G.V. // High Temp. 1994. V. 32. No. 6. P. 806.
25. Lipnyagov E.V., Parshakova M.A., Perminov S.A., Ermakov G.V. // Int. J. Heat Mass Trans. 2013. V. 61. No. 1. P. 612.

Multi-threshold character of spontaneous heterogeneous boiling-up of superheated liquid in a glass tube

M. A. Parshakova^{1, *}, E. B. Lipnyagov¹

*¹The Institute of Thermal Physics of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620016, Russia*

**e-mail: parmari@yandex.ru*

A series of experimental investigations is presented, in which the kinetics of spontaneous heterogeneous boiling-up of superheated *n*-pentane in two glass tubes has been studied. It has been established that isobaric temperature dependences of the mean lifetime of a superheated liquid obtained under similar conditions have threshold values in the temperature range of 100–115, 120–125 and 130–140 °C.

Keywords: boiling-up, superheat, heterogenous nucleation, *n*-pentane