

УДК 536.423

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ ВСКИПАНИЯ И ГРАНИЦЫ ПЕРЕГРЕВА Н-ГЕКСАНА В ЖЕСТКИХ ПОРОШКОВЫХ СТРУКТУРАХ*

А.Л. ГУРАШКИН, С.А. ПЕРМИНОВ, Г.В. ЕРМАКОВ

Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург

Описана экспериментальная установка и приведены результаты измерений среднего времени ожидания вскипания перегретого н-гексана в жестких структурах из порошкообразных активированного угля, целлюлозы и силикагеля в зависимости от температуры при атмосферном давлении. Измерениям предшествовала “приработка” ячейки с наполнителем, состоящая для разных наполнителей от 600 до 1000 вскипаний. Предложен новый способ анализа “приработки”, который заключается в сравнении усредненного потока (частоты) зародышеобразования по времени, полученного из обработки экспериментальных данных, с частотой зародышеобразования, рассчитанной из экспоненциального распределения. К концу “приработки” для силикагеля средний эмпирический поток уменьшается в 4 раза относительно экспоненциального. Для активированного угля и целлюлозы указанные потоки отличаются друг от друга на 20 %. При этом эмпирический поток всегда оказывается нестационарным. Для н-гексана в изучаемых системах граница перегрева составляет $T_n/T_{кр} \cong 0,873 \pm 0,875$, против $T_n/T_{кр} \cong 0,883$ для н-пентана в системах с наполнителями в виде порошка никеля, спеченного пористого никеля с размером гранул 1,5 и 5,0 мкм и в присутствии гладкой медной пластинки. Средние времена ожидания вскипания н-гексана при низких приведенных температурах также оказываются существенно ниже, чем у н-пентана. Времена ожидания очень близки у всех систем в области температур $T_n/T_{кр} \cong 0,860 \pm 0,874$ (плато). Таким образом, уменьшение количества перегреваемой жидкости и дробление ее на малые жидкостные элементы не приводят к увеличению времени жизни жидкости в состоянии перегрева и температуры ее достижимого перегрева, как можно было бы ожидать на основании классической теории гомогенного зародышеобразования.

ВВЕДЕНИЕ

Кинетика вскипания перегретых жидкостей, как правило, исследуется в простых системах, в которых в максимальной степени устранены факторы, инициирующие вскипание [1–5]. Сама возможность перегрева жидкостей в сложных системах, содержащих различные центры вскипания, не очевидна. Более того, для этих систем не известны температурная граница перегрева, времена существования перегретого состояния при разных температурах, зависимость этих величин от технологии приготовления системы. Таким образом, изучение кинетики образования пузырьков пара в сложных системах имеет самостоятельное значение, а ее теоретическое описание может содействовать более полному, детальному пониманию механизма вскипания. Кроме того, присутствие жесткой порошкообразной структуры в ячейке, существенно уменьшает объем перегреваемой жидкости, которая оказывается еще и раздробленной на большое число малых жидкостных

* Работа выполнена при финансовой поддержке Президента РФ (НШ-905.2003.2) и РФФИ (грант 04-02-16285).

элементов. На основании кинетической теории гомогенного зародышеобразования в перегретых жидкостях можно ожидать увеличения среднего времени жизни жидкости в состоянии перегрева и температуры достижимого перегрева.

Как и в чистой системе, в сложной системе также реализуется некоторый случайный процесс, приводящий к возникновению сверхкритического, способного к детерминированному росту, зародыша пара, разделяющего систему на макроскопические фазы. Этот случайный процесс характеризуется потоком (частотой) образования таких зародышей $\lambda(\tau)$. Если этот процесс стационарен, как предполагается в классической теории гомогенного зародышеобразования Зельдовича–Кагана, то функции распределения вероятностей оказываются экспоненциальными:

$$F(\tau) = 1 - \exp(-\lambda_{\text{экспо}} \cdot \tau), \quad (1)$$

$$f(\tau) = dF(\tau)/d\tau = \lambda_{\text{экспо}} \exp(-\lambda_{\text{экспо}} \tau), \quad (2)$$

с параметром, который не зависит от времени и связан со средним временем вскипания соотношением

$$\lambda_{\text{экспо}} = \tau^{-1}. \quad (3)$$

В общем случае такой случайный процесс является, конечно, нестационарным, но это следует устанавливать на основании анализа экспериментальных данных.

Одной из первых работ в исследовании сложных систем была, вероятно, работа Е.Н. Сеницына и В.С. Ускова [6], в которой изучалось вскипание органической жидкости в стеклянном капилляре в присутствии металлической проволоочки, содержащей центры кипения. Важным результатом этой работы явилось достижение температуры перегрева, весьма близкой к границе перегрева в чистой стеклянной ячейке. Позднее были поставлены эксперименты с полированными металлическими трубками [7, 8], со стеклянными трубками, содержащими металлические пластинки (медь, свинец), пористые структуры, спеченные из мелкодисперсных никеля и титана, и никелевый порошок [9–13]. Они демонстрировали возможность весьма высокого перегрева исследуемых жидкостей, сопоставимого с температурой, достигаемой в чистых стеклянных ячейках.

Существенной частью технологии приготовления системы к опытам является так называемая приработка ячейки. Она представляет собой предварительные вскипания исследуемой жидкости в количестве до нескольких сотен [1–2]. Вскипание жидкости является мощным воздействием на твердые поверхности, содержащие центры вскипания. Приработка приводит к разрушению этих центров, увеличению времени жизни жидкости в состоянии перегрева и температуры достижимого перегрева. После достаточно продолжительной приработки стабилизируются температурная зависимость среднего времени ожидания вскипания и величина предельной температуры перегрева. В случае сложных систем воспроизводимость средних значений параметров, характеризующих вскипание, вовсе не означает переход к гомогенному типу вскипания.

В настоящей работе представлены результаты исследования вскипания *n*-гексана на структурах (насыпках) из адсорбентов — активированного угля, порошковой целлюлозы и силикагеля. На величину температуры перегрева жидкостей большое влияние оказывает смачиваемость исследуемой жидкостью контактирующих с ней твердых поверхностей. Переход от металлических порошков к адсорбентам позволяет существенно изменять условия на границе исследуемой жидкости с частицами мелкодисперсной твердой фазы, а также характер температурной зависимости среднего времени ожидания вскипания и предельной температуры перегрева.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Экспериментальная установка представляет собой чистую пузырьковую камеру (с ячейкой из стекла) [1–2], автоматизированную на базе персонального компьютера. В эксперименте непосредственно измеряется время жизни перегретой жидкости в присутствии мелкодисперсных порошков, различной химической природы.

Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1. Установка состоит из следующих узлов: I — измерительной ячейки, II — системы создания и поддержания давления, III — системы термостатирования и измерения температуры, IV — системы измерения и регистрации времени ожидания вскипания жидкости. Перегрев жидкости в ней достигается быстрым понижением давления ниже давления насыщенного пара при заданной температуре.

Измерительная ячейка представляет собой толстостенный капилляр из молибденового стекла, запаянный с одной стороны, в который помещается мелкодисперсный порошок. Технология изготовления такой измерительной ячейки содержит следующие операции. Перед запайкой стеклянный капилляр тщательно промывается спиртом, а после запайки — несколько раз исследуемой жидкостью. В капилляр засыпается исследуемый порошок, уплотняется с помощью ультразвуко-

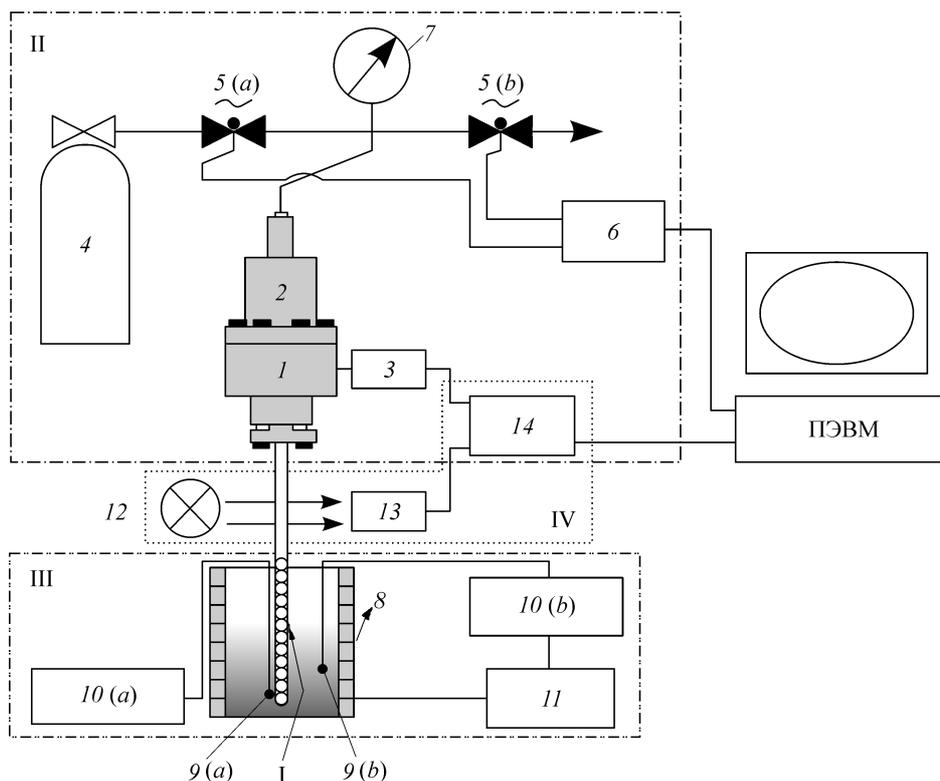


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

I — измерительная ячейка, II — система создания и поддержания давления: 1 — рабочая камера, 2 — камера высокого давления, 3 — преобразователь давления, 4 — баллон с углекислотой, 5(a), 5(b) — электроклапаны, 6 — коммутатор, 7 — манометр образцовый; III — система термостатирования и измерения температуры: 8 — термостат (имеет мешалку с электрическим приводом для выравнивания температуры и подъемник для регулирования величины перегреваемого объема, на рисунке не показаны), 9(a) — измеряющая термопара, 9(b) — регулирующая термопара, 10(a, b) — вольтметры, 11 — термокон, IV — система измерения и регистрации времени ожидания вскипания жидкости: 12 — источник света, 13 — датчик освещенности, 14 — АЦП.

вого диспергатора (УЗДН-1), запирается сначала слоем стекловаты, а затем слоем кварцевого порошка. В области, заполненной кварцевым порошком, капилляр оттягивается, благодаря чему запирающая пробка фиксируется. Такая конструкция не позволяет наполнителю “выскочить” в систему при вскипании, сохраняя при этом низкое гидравлическое сопротивление. Все компоненты описанной системы предварительно промываются исследуемой жидкостью и сушатся при температуре около 250 °С.

После изготовления, измерительная ячейка устанавливается в рабочую камеру 1 (см. рис. 1) экспериментальной установки. Рабочая камера предназначена, во-первых, для подсоединения системы заполнения установки, во-вторых, для разделения, с помощью сильфона из нержавеющей стали, исследуемой жидкости и газообразной двуокиси углерода, находящейся в баллоне 4 и создающей давление, и в-третьих, для установки преобразователя давления 3.

Обезгаживание исследуемой жидкости и заполнение ею экспериментальной установки производится с помощью системы дегазации жидкости и заполнения установки [14]. Она содержит следующие элементы: две заправочные емкости с электрическими нагревателями и исследуемой жидкостью, которые помещены в сосуды для заливки жидкого азота; систему трубопроводов и вентиляей; вакуумметр, азотную ловушку и форвакуумный насос. Описанная система позволяет реализовать метод дегазации исследуемой жидкости откачкой при пониженной температуре, а также путем перекристаллизации.

Перед заполнением гидравлическая система установки и измерительная ячейка с мелкодисперсным порошком откачиваются до форвакуума, причем измерительная ячейка постепенно нагревается до температуры около 190 °С. После просушки адсорбента система заполняется путем переконденсации обезгаженным н-гексаном.

Давление в измерительной ячейке 1 (см. рис. 1) устанавливается с помощью системы создания и поддержания давления в П. Из баллона с углекислотой 4 сжатый газ поступает по коммуникациям в камеру высокого давления 2. Изменение давления происходит благодаря подаче напряжения на электроклапаны 5 через коммутатор 6, режим работы которого задается ПЭВМ. Обратная связь исследуемой системы с ПЭВМ осуществляется через АЦП 14 преобразователем давления КРТ 5-13, который установлен на расстоянии 15 см от верхней границы рабочего объема ячейки по вертикали. Визуальное наблюдение за изменением давления ведется по образцовому манометру 7 с верхним пределом измерения 25 кгс/см² и классом точности 0,4. Погрешность в определении давления составляет 0,01 МПа.

Понижение давления происходит по стандартной схеме в 2 этапа [1]. Первый этап имеет целью уменьшить отклонение температуры от равновесной. После первого сброса система выдерживается около 10 с при промежуточном давлении от 5 до 11 бар для интервала температур 383,1–444,1 К. Метастабильное состояние реализуется при втором понижении давления от промежуточного значения до атмосферного, которое осуществляется приблизительно за 1,5 с. При такой скорости понижения давления волна разрежения не возникает, что можно увидеть на экране ПЭВМ. Включение часов происходит при достижении атмосферного давления, с погрешностью преобразователя давления 0,03 бар. Вскипание перегретой жидкости имеет взрывообразный характер. В результате в области датчика освещенности (TSL2500R) 13, установленного на измерительной ячейке 1 на расстоянии 6 см по вертикали от зеркала термостатирующей жидкости, жидкая фаза заменяется на паровую. Вскипание фиксируется датчиком освещенности, время нарастания выходного напряжения на котором составляет 260 мкс, благодаря различию в коэф-

фициентах преломления фаз. Суммарная систематическая погрешность определения времени оценивается в 0,1 с. Она оказывается существенно меньше статистической.

Измерение времени жизни жидкости происходит при заданной температуре. Для создания требуемой температуры используется блок термостатирования и измерения температуры III. Рабочая часть измерительной ячейки помещается в жидкостный термостат 8. Внутри термостата находится высокотемпературный кремнеорганический теплоноситель ПЭС-4, температура которого изменяется с помощью наружного и внутреннего нагревателей и который перемешивается мешалкой (не показан на рис. 1). Регулирование температуры производится автоматически ТЕРМОКОНОм-3 11, по принципу включения–выключения внутреннего нагревателя. Обратная связь регулируемой системы с ТЕРМОКОНОм-3 реализуется через вольтметр 10б (Щ-300), к которому подключена медьконстантановая термопара 9, б, находящаяся в теплоносителе. Непосредственное наблюдение за температурой на измерительной ячейке производится дополнительной медьконстантановой термопарой 9, а, подсоединенной к вольтметру 10, а (Щ-304-2). Такой способ задания температуры обеспечивает погрешность в 0,1 К.

Надо сказать, что в классических работах [1–2] отсчет времени жизни жидкости в перегретом состоянии начинается при сбросе давления, который длится около двух секунд. Затем это значение вычитается из каждого результата и полученная выборка обрабатывается методами статистики. Такая процедура увеличивает погрешность измерения и уменьшает надежность проверки теории нуклеации [1].

Таким образом, созданная установка позволяет производить измерения времени жизни жидкости в перегретом состоянии при установившихся температуре и давлении. Измерение времени ожидания вскипания производится в разных опытах от 20 до 100 раз. Статистическая погрешность среднего времени жизни жидкости в перегретом состоянии вычисляется как среднее квадратичное отклонение от среднего, умноженное на коэффициент Стьюдента, определяемый числом измерений и величиной доверительной вероятности [15], которая принимается равной 90 %. В работе использован н-гексан марки “ХЧ” (ТУ 2631-003-05807999-98).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 представлены основные характеристики изученных систем: средний размер гранул мелкодисперсных порошков (\bar{d}), объем системы н-гексан–мелкодисперсный порошок, перегреваемый в термостате ($V_{\text{раб}}$), объем н-гексана в такой системе ($V_{\text{н-гексана}}$), метод дегазации, число вскипаний при приработке (N), изученный интервал температур и предельные значения температур, достигнутые в опытах.

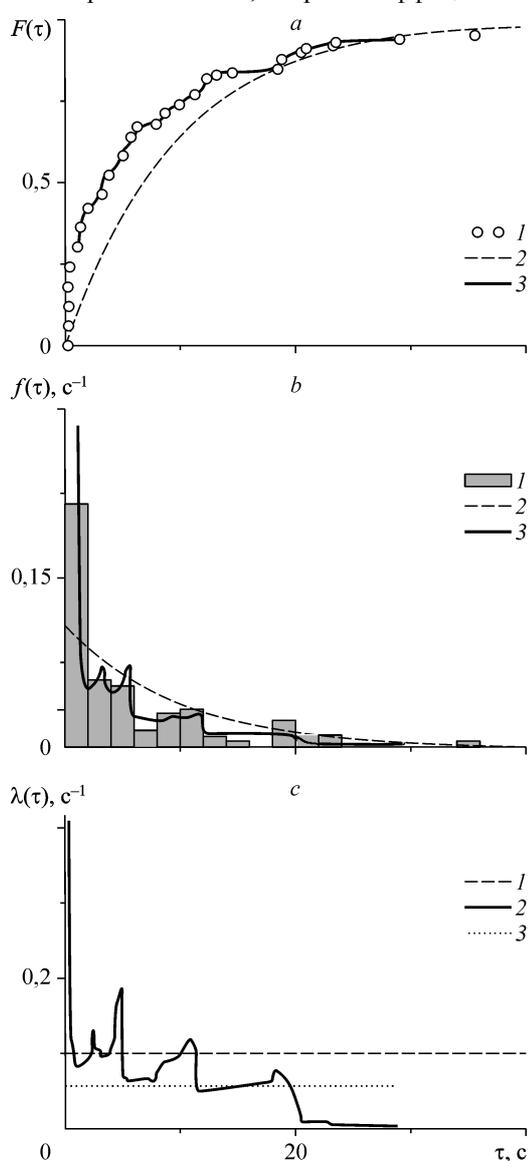
Таблица 1
Сводная таблица основных характеристик изучаемых систем

Вещество	\bar{d} , мкм	$V_{\text{раб}}$, см ³	$V_{\text{н-гексана}}$	метод дегазации	N	Изучаемый температурный интервал, К
Силикагель	100–250	0,026	0,019	откачка	600	413,1–443,1
Активированный уголь	10–50	0,05	0,006	откачка	288	383,1–443,1
Целлюлоза	10–50	0,03	0,018	перекристаллизация	275	389,1–444,1

Приработка экспериментальных ячеек

Измерениям предшествует приработка изучаемой сложной системы. Ее ход контролируется анализом последовательных выборок по сто измерений времени ожидания вскипания. Для каждой выборки вычисляли среднее время ожидания вскипания, строили гистограмму, затем располагали измеренные значения времени жизни в порядке возрастания (вариационный ряд) и строили эмпирическую интегральную функцию распределения как отношение номера члена вариационного ряда к числу измерений в зависимости от времени ожидания вскипания [16]. Полученную эмпирическую интегральную функцию распределения сравнивали с экспоненциальным распределением (рис. 2, *a*, 3, *a*). Плотность распределения вероятностей получали численным дифференцированием интегральной функции распределения.

Для этого последовательные небольшие участки (11 точек) интегральной функции распределения с помощью метода наименьших квадратов аппроксимировали прямой линией, второй коэффициент которой, характеризующий наклон отрезка, принимали в качестве иско-



мой производной. Найденное значение относили к средней точке отрезка. Затем отбрасывали первую точку отрезка и добавляли точку, следующую за последней, и повторяли расчет. Таким образом, получали значение производной во всех точках интегральной кривой за исключением пяти начальных и пяти последних точек. О погрешности производной судили по величине ее среднего квадратичного отклонения. Оцениваем таким образом погрешность изменяется приблизительно от 8 % в начале интегральной кривой до 20 % с увеличением времени ожидания вскипания. Увеличение

Рис. 2. Анализ приработки в системе *n*-гексан-силикагель. Первая серия приработки.

a — интегральная функция распределения времен ожидания вскипания: данные эксперимента (1), экспоненциальное распределение (2), аппроксимация данных (3); *b* — плотность распределения вероятностей времен ожидания вскипания: экспериментальная гистограмма (1), экспоненциальное распределение (2), эмпирическое распределение, полученное численным дифференцированием (3); *c* — зависимость частоты зародышеобразования от времени: экспоненциальное распределение (1), зависимость эмпирической частоты зародышеобразования от времени с использованием численного дифференцирования (2), среднее значение эмпирической частоты зародышеобразования (3).

Рис. 3. Анализ приработки в системе н-гексан–силикагель. Шестая (заключительная) серия приработки. Обозначения соответствуют рис. 2.

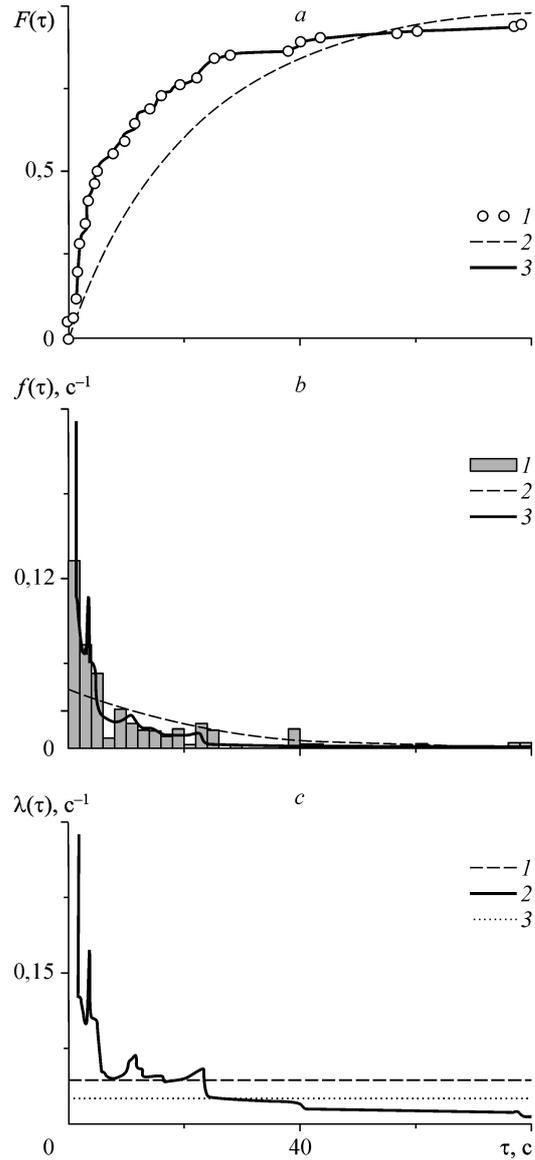
погрешности до 35 % происходит вблизи мест нарушения монотонности интегральной кривой. В области резкого перехода интегральной кривой к асимптотическому значению, равному единице, она составляет около 50 %. Таким образом, погрешность производной увеличивается вдоль интегральной кривой от 8 до 50 %. Сравнение гистограммы с эмпирической функцией плотности распределения вероятностей показывает, что последняя хорошо вписывается в гистограмму (см. рис. 2, *b*, 3, *b*). Этот факт свидетельствует о близости приближений плотности распределения вероятностей, полученных обоими методами (построения гистограммы и численного дифференцирования интегральной функции).

При наличии интегральной и дифференциальной функций распределения легко может быть определен поток (частота) изучаемых случайных событий во всей системе. Для этого запишем вероятность вскипания исследуемой жидкости вблизи заданного момента времени за бесконечно малый промежуток времени.

С одной стороны, это может выглядеть как произведение вероятностей того, что жидкость не вскипит до момента времени τ , и того, что она вскипит за бесконечно малый промежуток $d\tau$. С другой стороны, эту же вероятность можно записать как произведение плотности распределения вероятностей в момент времени τ на бесконечно малый промежуток $d\tau$. Приравнявая эти два выражения, получим соотношение для вычисления искомого потока событий

$$\lambda(\tau) = \frac{f(\tau)}{1 - F(\tau)}. \quad (4)$$

Если положить $\lambda(\tau) = \text{const}$ и учесть связь дифференциальной и интегральной функций распределения, то решение уравнения (4) даст экспоненциальное распределение (1), (2).



Во всех случаях, как при приработке, так и после нее, поток, найденный с помощью (4), оказывается зависящим от времени. Таким образом, случайный процесс, приводящий к возникновению закритического жизнеспособного парового пузырька, в данных системах является нестационарным. Этот вывод следует из всей совокупности полученных данных, в том числе и тех, которые не приведены в статье. Для количественного сравнения нестационарного распределения с экспоненциальным (1), вычислим по результатам определения $\lambda(\tau)$ его среднее значение для исследованного промежутка времени:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{b-a} \int_a^b \lambda(\tau) d\tau. \quad (5)$$

На рис. 2 представлены все анализируемые величины, относящиеся к вскипанию на силикагеле в первой серии приработки. Рисунок показывает, что экспоненциальное распределение отличается от эмпирического. Это видно при сравнении интегральных функций распределения (рис. 2, *a*) и, существенно лучше, при сравнении плотностей распределения вероятностей и гистограммы (рис. 2, *b*). Различие между эмпирическим распределением и экспоненциальным совершенно ясно обнаруживается при сравнении потока вскипаний (рис. 2, *c*). В отличие от экспоненциального распределения, для которого поток является постоянной величиной, эмпирический поток оказывается зависящим от времени (нестационарным). Вычисление среднего значения эмпирического потока дает значение почти в два раза меньше, чем экспоненциальное распределение.

На рис. 3 представлены данные для последней серии приработки силикагеля. Видно, что экспоненциальная и эмпирическая интегральные функции распределения в конце приработки заметно расходятся. Еще более, чем в начале приработки, отличаются эмпирическая и экспоненциальная плотности распределения вероятностей. Поток вскипаний остается нестационарным, а его среднее значение уменьшается по сравнению с первоначальным почти в три раза. По отношению к экспоненциальному потоку, который тоже уменьшается, он оказывается, как и в начале приработки, почти в два раза меньше. Подобные расхождения между эмпирическими и экспоненциальными зависимостями наблюдаются во всех промежуточных сериях. В табл. 2 представлены количество вскипаний в серии (N_i), среднее время ожидания вскипания ($\bar{\tau}$), значения экспоненциального ($\lambda_{\text{экспо}}$) и среднего эмпирического ($\bar{\lambda}$) потоков вскипаний для всех адсорбентов и всех серий.

Таблица 2
Сводная таблица основных экспериментальных и расчетных характеристик изученных систем в зависимости от серии приработки

Вещество	№ серии	N_i	$\bar{\tau}, c$	$\lambda_{\text{экспо}}, c^{-1}$	$\bar{\lambda}, c^{-1}$
Силикагель	1	100	9,2	0,108	0,031
	2	100	9,1	0,110	0,072
	3	100	23,2	0,043	0,012
	4	100	10,0	0,099	0,022
	5	100	24,4	0,041	0,024
	6	100	22,2	0,045	0,012
Активированный уголь	1	103	11,8	0,084	0,080
	2	102	11,5	0,087	0,083
	3	83	30,2	0,033	0,027
Целлюлоза	1	100	13,0	0,077	0,093
	2	100	16,4	0,061	0,065
	3	75	20,2	0,049	0,041

Приработка двух других адсорбентов несколько отличается от приработки силикагеля. Приработка целлюлозы состояла из 9 серий, из которых три последних представлены в табл. 2. Общее число вскипаний составило 1052. Приработка начиналась при температуре 389,1 К и заканчивалась при температуре 444,1 К. Отличие состоит в том, что к концу приработки величина $\lambda(\tau)$ не выходит на постоянное значение, близкое к нулю, как в случае силикагеля (см. рис. 3). Картина приработки ячейки с активированным углем качественно и даже количественно подобна приработке ячейки, заполненной целлюлозой.

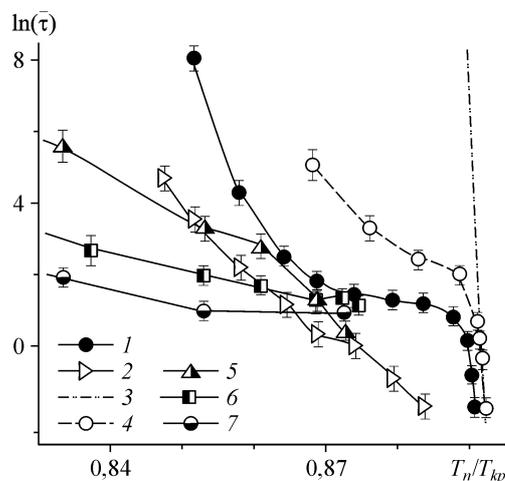
Таким образом, приработка выражается в увеличении среднего времени ожидания вскипания и в уменьшении потоков вскипаний. Наблюдаемые различия между полученными величинами потоков (табл. 2) можно объяснить следующим образом. Число флуктуационных центров вскипания, остающихся в каждой системе к концу приработки, оказывается различным. Каждый флуктуационный центр вскипания порождает свой поток. Результирующий поток является их суммой. В соответствии с теоремой теории массового обслуживания [15] результирующий поток будет близок к экспоненциальному, если в сумме будет более 5–10 членов. Таким образом, при приработке силикагеля существенная часть флуктуационных центров вскипания была уничтожена. При приработке же целлюлозы и активированного угля добиться такого не удалось, несмотря на значительное увеличение длительности приработки для целлюлозы.

Результаты измерений

На рис. 4 в зависимости от приведенной температуры представлены результаты измерений среднего времени ожидания вскипания н-гексана на всех трех адсорбентах (данные получены после завершения процесса приработки) в сравнении со средними временами ожидания вскипания н-пентана в чистых ячейках без наполнителя, а также с наполнителем в виде порошка никеля. Как видно, в присутствии порошка никеля достигаются существенно более высокие перегревы, чем на жестких структурах из адсорбентов. Если для н-пентана граница достижимого перегрева в условиях контакта с порошком никеля достигает величины около 0,893 от $T_{кр}$, то для н-гексана в условиях контакта с адсорбентами эта величина достигает только 0,873–0,875 от $T_{кр}$. Следует также отметить, что в области плато ($T_n/T_{кр} = 0,860–0,874$) результаты, полученные на н-пентане и никелевой структуре, весьма близки к результатам, полученным на н-гексане и адсорбентах. Участок кривой, соответствующий температурам, превышающим 0,875 от $T_{кр}$, для н-гексана разрешить не удается.

Рис. 4. Сравнение экспериментальных значений среднего времени ожидания вскипания н-пентана и н-гексана в присутствии различных поверхностей в зависимости от приведенной температуры.

н-пентан ($V_{раб} = 0,06 \text{ см}^3$): чистая ячейка (1), никелевый порошок (2); н-гексан: расчет по теории гомогенной нуклеации Зельдовича–Кагана ($V_{раб} = 0,06 \text{ см}^3$) (3), чистая ячейка ($V_{раб} = 0,06 \text{ см}^3$) (4), ячейка с силикагелем ($V_{раб} = 0,026 \text{ см}^3$) (5), ячейка с активированным углем ($V_{раб} = 0,05 \text{ см}^3$) (6), ячейка с целлюлозой ($V_{раб} = 0,03 \text{ см}^3$) (7).



Таким образом, оказывается, что случайный процесс, приводящий к возникновению сверхкритического жизнеспособного парового пузырька, детерминированный рост которого разделяет систему на макроскопические фазы, является нестационарным. Уменьшение количества перегреваемой жидкости и дробление ее на малые жидкостные элементы не приводят к увеличению времени ожидания вскипания жидкости и температуры ее достижимого перегрева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. — М.: Наука, 1972. — 312 с.
2. Скрипов В.П., Сеницын Е.Н., Павлов П.А., Ермаков Г.В. и др. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии. — М.: Атомиздат, 1980. — 208 с.
3. Павлов П.А. Динамика вскипания сильно перегретых жидкостей. — Свердловск: УрО АН СССР, 1988. — 245 с.
4. Байдаков В.Г. Перегрев криогенных жидкостей. — Екатеринбург: УрО РАН, 1995. — 264 с.
5. Ермаков Г.В. Термодинамические свойства и кинетика вскипания перегретых жидкостей. — Екатеринбург: УрО РАН, 2002. — 272 с.
6. Сеницын Е.Н., Усков В.С. Вскипание перегретой жидкости в присутствии металлической поверхности в изотермических условиях // Инж.-физ. журн. — 1983. — Т. 19, № 1. — С. 19–22.
7. Каверин А.М., Байдаков В.Г., Скрипов В.П., Катянов А.Н. Предельные перегревы жидкого кислорода в металлических ячейках // Журн. техн. физики. — 1985. — Т. 55, № 6. — С. 1220–1222.
8. Байдаков В.Г., Каверин А.М. Кинетика гомогенного и гетерогенного зародышеобразования в перегретом жидком азоте // Теплофизика высоких температур. — 1990. — Т. 28, № 1. — С. 90–96.
9. Сеницын Е.Н., Падерин И.М. Вскипание перегретого н-пентана на пористом никеле в изотермических условиях // Теплообмен. — Минск: ИТМО БАН, 1988. — Т. 4. — С. 169–171.
10. Сеницын Е.Н., Падерин И.М. Вскипание перегретого н-пентана на пористом никеле при непрерывном сбросе давления // Тепловые процессы и метастабильные состояния. — Свердловск: УрО РАН, 1990. — С. 54–56.
11. Падерин И.М., Усков В.С. Вскипание умеренно перегретых жидкостей на пористой поверхности // Термодинамика и кинетика кипения. — Екатеринбург: УрО РАН, 1993. — С. 85–89.
12. Падерин И.М., Усков В.С., Ермаков Г.В. Кинетика вскипания перегретой жидкости в присутствии пористой и гладкой поверхностей // Теплофизика высоких температур. — 1994. — Т. 32, № 6. — С. 863–866.
13. Падерин И.М., Ермаков Г.В. Вскипание перегретого н-пентана на никелевом порошке // Тр. II национ. конф. по теплообмену. — М.: МЭИ, 1998. — Т. 4. — С. 195–198.
14. Гурашкин А.Л., Ермаков Г.В. Результаты экспериментального изучения кинетики вскипания и границы перегрева н-гексана в структурах из силикагеля и порошковой целлюлозы // Метастабильные состояния и фазовые переходы. [Сб. науч. трудов. Вып. 7]. — Екатеринбург: УрО РАН, 2004. — С. 251–260.
15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. — М.: Наука, 1969. — 576 с.
16. Справочник по теории вероятностей и математической статистике / В.С. Корольок, Н.И. Портенко, А.В. Скороход, А.Ф. Турбин. — М.: Наука, 1985. — 640 с.

Статья поступила в редакцию 26 июля 2006 г.