

А.Л. Гурашкин, Г.В. Ермаков, С.А. Перминов

Институт теплофизики УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

ВСПИПАНИЕ ПЕРЕГРЕТОГО Н-ГЕКСАНА В ЖЕСТКИХ СТРУКТУРАХ ИЗ НАНОПОРОШКОВ

АННОТАЦИЯ

В работе описана экспериментальная установка и методика измерений среднего времени ожидания вскипания сильно перегретого н-гексана в жестких структурах из нанопорошков. Приведены результаты измерений в структурах из Al_2O_3 и (Al+ Pb 0,2 % ат.) вдоль изобары $p' = 1$ атм и изотермы $T=440$ К (для Al_2O_3). По наклону изотермы в зависимости от давления с помощью формулы Журкова, записанной для перегретой жидкости, вычислены работа образования и объем зародыща, приводящего систему к разделению на макроскопические фазы. Полученные величины отличаются от соответствующих величин для гомогенной системы в зависимости от давления от 55 до 132 раз.

1. ВВЕДЕНИЕ

Кинетика вскипания перегретых жидкостей, как правило, исследуется в простых системах, в которых, по возможности, устранены факторы, инициирующие вскипание [1 – 5]. Сама возможность перегрева жидкостей в сложных системах, содержащих различные центры вскипания, не очевидна. Тем более, для таких 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.

В настоящей работе произведены измерения среднего времени ожидания вскипания перегретого н-гексана в жестких структурах из нанопорошков Al_2O_3 и (Al+ Pb 0,2 % ат.) со средним размером гранул около 7 и 100 нм соответственно. Измерения проведены по изобарам $p' = 1$ атм, а также по изотерме $T=440$ К (для Al_2O_3) в интервале давлений 1–4,5 бар.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Блок-схема экспериментальной установки показана на рис.1. Она представляет собой чистую пузырьковую камеру [1–2], стеклянный капилляр которой заполнен исследуемой насадкой.

Установка автоматизирована на базе ПЭВМ и состоит из следующих узлов: I – измерительной ячейки, II – блока создания и поддержания давления, III – блока термостатирования и измерения температуры, IV – блока измерения и регистрации времени ожидания вскипания жидкости.

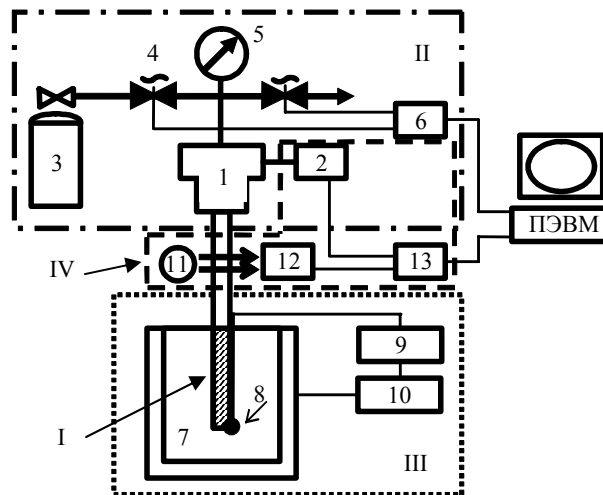


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: I – измерительная ячейка, II – блок создания и поддержания давления: 1 – камера высокого давления, 2 – датчик давления, 3 – баллон с углекислотой, 4 – электроклапан, 5 – манометр образцовый, 6 – коммутатор; III – блок термостатирования и измерения температуры: 7 – термостат, 8 – термопара, 9 – вольтметр, 10 – термокон, IV – блок измерения и регистрации времени ожидания вскипания жидкости: 11 – источник света, 12 – фотоэлемент, 13 – АЦП

Технология изготовления измерительной ячейки содержит следующие операции. Перед запайкой стеклянный капилляр тщательно промывали спиртом, а после запайки – несколько раз исследуемой жидкостью. В капилляр засыпается исследуемый порошок, который уплотняется с помощью ультразвукового диспергатора (УЗДН-1). Затем эта насыпка запирается 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 сборки экспериментальная установка заполняется н-гексаном, предварительно обезгаженным на специальном стенде, методом переконденсации [6].

Давление в измерительной ячейке I (см. рис.1) осуществляется с помощью блока создания и поддержания давления II. Из баллона с углекислотой

(3) сжатый газ CO_2 поступает по коммуникациям в камеру высокого давления (1). Изменение режимов давления происходит за счет подачи напряжения на электроклапаны (4) через коммутатор (6), режим работы которого задается ПЭВМ. Обратная связь исследуемой системы с ПЭВМ осуществляется через датчик давления (2). Визуальное наблюдение за изменением давления ведется по образцовому манометру (5).

Для создания требуемой температуры используется блок термостатирования и измерения температуры III. Рабочая часть измерительной ячейки помещается в термостат (7). Внутри термостата находится теплоноситель ПЭС-4, температура которого изменяется с помощью нагревателя. Режим работы нагревателя задается ТЕРМОКОНОм-4 (10), по принципу включения/выключения нагревателя. Обратная связь исследуемой системы с ТЕРМОКОНОм-4 реализуется через вольтметр Щ-300 (9), к которому подключена термопара (8), находящаяся в теплоносителе. Такой способ задания температуры обеспечивает погрешность в 0,1 К.

В опыте измеряется время жизни жидкости τ в перегретом состоянии следующим способом. После выдержки под давлением при заданной температуре в течение 1,5 минут производится автоматический сброс давления в два этапа в целях уменьшения адиабатического охлаждения жидкости. Отсчет времени жизни начинается после установления равновесных значений давления p' (посредством датчика давления (2)) и температуры T . Момент вскипания фиксируется фотоэлементом (12) и через АЦП (13) поступает на ПЭВМ. Этот способ измерения времени жизни исследуемой жидкости имеет такие плюсы, как достаточно высокая точность измерения времени и отсутствие необходимости вносить поправки в экспериментально полученный статистический материал.

Измерение времени ожидания вскипания при заданной температуре и давлении производится в разных опытах от 20 до 100 раз. Статистическая погрешность среднего времени жизни жидкости $\bar{\tau}$ в перегретом состоянии вычисляется как среднее квадратичное отклонение от среднего, умноженное на коэффициент Стьюдента, определяемый числом измерений и величиной доверительной вероятности [7], которая принимается равной 90%. Перед началом измерений проводится «приработка» ячейки [6].

Опыты проведены с н-гексаном марки «ХЧ» (ТУ 2631-003-05807999-98).

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлены экспериментальные зависимости $\ln(\bar{\tau})$ от температуры для чистой стеклянной ячейки и нанопорошков Al_2O_3 и $(\text{Al} + \text{Pb } 0,2\% \text{ ат.})$

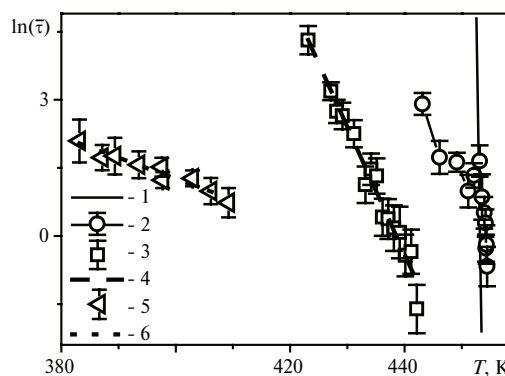


Рис. 2. Температурная зависимость среднего времени жизни перегретого н-гексана при $p=1$ атм: 1 – расчет по ТГЗ; 2 – чистая ячейка ($V=0,06 \text{ см}^3$); 3 – ячейка с Al_2O_3 ($V=0,06 \text{ см}^3$); 5 – ячейка с $(\text{Al} + \text{Pb } 0,2\% \text{ ат.})$ ($V=0,045 \text{ см}^3$); 4, 6 – аппроксимация уравнением $y = a + bx$

Зависимости $\ln(\bar{\tau})$ от температуры вдоль изобары для нанопорошков близки к прямым линиям с существенно различающимся наклоном. Температура, соответствующая границам достижимого перегрева, оказывается весьма высокой для таких сложных систем. Она составляет для Al_2O_3 – 442,2 К, что только на 13–14 К ниже границы достижимого перегрева в чистой стеклянной ячейке. Для $(\text{Al} + \text{Pb } 0,2\% \text{ ат.})$ эти величины соответственно составляют 409,2 К и 46–47 К. (Для н-гексана температура насыщения при атмосферном давлении составляет 341,9 К).

На рис. 3 представлена изотерма $\ln(\bar{\tau})$ в зависимости от давления при температуре 440 К для нанопорошка Al_2O_3 .

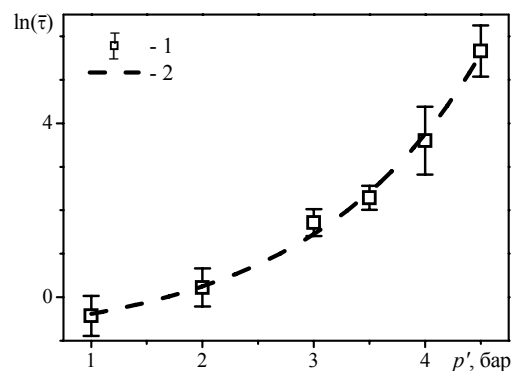


Рис. 3. Зависимость среднего времени перегретого н-гексана от давления при $T=440$ К для Al_2O_3 : 1 – экспериментальные значения; 2 – аппроксимация уравнением $y = a + be^{cx}$

Изотерма $\ln(\bar{\tau})$ для Al_2O_3 как функция давления в жидкости имеет форму, близкую к экспоненциальной. Оценим по полученным экспериментальным данным с помощью соотношений классической гомогенной теории зародышеобразования (ТГЗ) (формулы Журкова, записанной для перегретой

жидкости [8, 9]) величину объема пара, приводящего к вскипанию, работы его образования и сравним полученные величины с теоретическими.

Средний объем гранулы вещества Al_2O_3 и межгранульный средний объем в этом веществе оценены по известному значению удельной поверхности.

Результаты расчетов показаны на рис. 4 и 5.

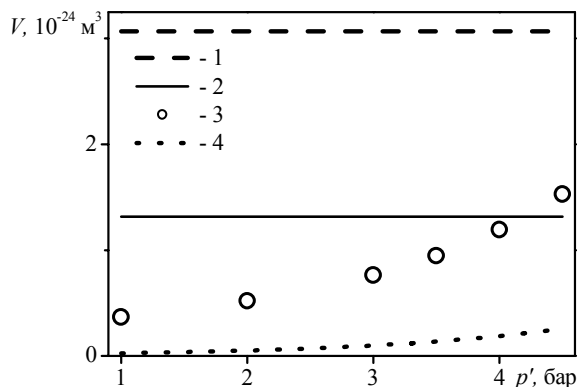


Рис. 4. Зависимость различных объемов от давления: 1 – средний объем межгранульных пустот; 2 – средний объем гранулы Al_2O_3 ; 3 – объем критического зародыша, найденный по ТГЗ; 4 – объем разрушающего зародыша, вычисленный по наклону экспериментальной кривой

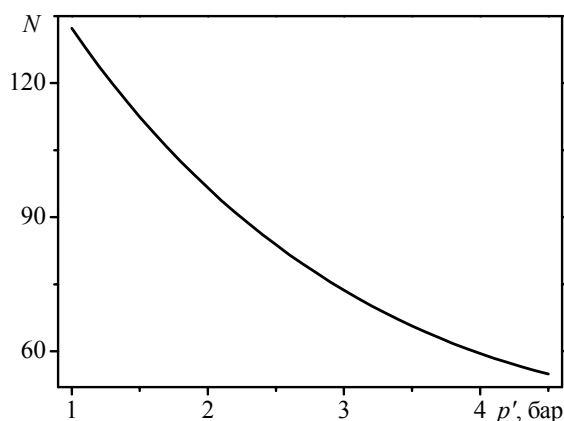


Рис. 5. Зависимость отношения N работы гомогенного образования критического пузырька и работы образования разрушающего пузырька, вычисленной по наклону изотермы

Вычисленные величины, как видно из рис. 4, имеют следующие значения: средний объем межгранульных пустот – $3.07 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$; средний объем гранулы – $1,32 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$; объем критического зародыша н-гексана изменяется от $0,37 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ при давлении 1 бар до $1,53 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ при давлении 4,5 бара; объем зародыша, приводящего к вскипанию, найденный по теории гомогенной нуклеации, изменяется от $0,03 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ до $0,26 \cdot 10^{-24} \text{ м}^3$ в том же интервале давлений.

Отношение работы образования критического пузырька N (рис. 5) в гомогенной жидкости к ра-

боте образования пузырька, приводящего к разрушению жидкой фазы, изменяется от 132 до 55 раз в изученном интервале давлений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью описанной в работе установки получены экспериментальные данные о температурной (изобары) и барической (изотермы) зависимости среднего времени ожидания вскипания н-гексана в жестких структурах из нанопорошков Al_2O_3 и (Al+ Pb 0,2 % ат.). Изобары близки к прямым линиям с существенно различным наклоном. Изотерма хорошо описывается экспоненциальной кривой. Температурная граница достижимого перегрева при атмосферном давлении оказывается весьма высокой для таких сложных систем. Она составляет 442,2 К для Al_2O_3 , что всего на 13...14 К ниже границы перегрева в чистой стеклянной ячейке. Для (Al+ Pb 0,2 % ат.) эта граница составляет 409,2 К, что на 46...47 К ниже, чем в чистой ячейке.

С использованием формулы Журкова, записанной для перегретой жидкости, по данным, полученным при постоянстве температуры, вычислены работа образования и объем зародыша, приводящего систему к разделению на макроскопические фазы. Полученные величины отличаются от соответствующих величин для гомогенной системы при увеличении давления от 132 до 55 раз. Таким образом, согласно критерию гомогенности вскипания жидкости, сформулированному в предыдущем докладе [9], вскипание н-гексана в изученной наноструктуре не является гомогенным, о чем свидетельствуют и другие показатели, например, снижение температуры достижимого перегрева.

Авторы благодарят В.П. Скрипова за предложение обратиться к анализу изотермических зависимостей среднего времени ожидания вскипания перегретой жидкости от давления и за полезное обсуждение результатов, а также В.И. Кононенко, предоставившего для исследований образцы нанопорошков.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проекты № 04-02-16285 и № НШ-905.2003.2

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

T – температура, К;
 V – объем, м^3 ;
 p – давление, Н/м^2 ;
 τ – время ожидания вскипания, с;
 $\bar{\tau}$ – среднее время жизни перегретой жидкости, с;
 W – работа образования зародыша, Дж.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скрипов В.П. Метастабильная жидкость. М.: Наука, 1972. 312 с.
2. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии / В.П. Скрипов, Е.Н. Синицын, П.А. Павлов, Г.В. Ермаков и др. 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. **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. тр. Вып. 7. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. С.251–259.
7. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1973. 832 с.
8. **В.П. Скрипов, В.Е. Виноградов.** Сопоставление двух кинетических подходов к долговечности растянутых образцов // Метастабильные состояния и фазовые переходы: Сб. науч. тр. Вып.7. Екатеринбург: УрО РАН, 2004.
9. **А.Л. Гурашкин, Г.В. Ермаков.** Расчет параметров сильно перегретой жидкости в режиме гомогенного и гетерогенного вскипания в чистой стеклянной ячейке // Труды РНКТ-4. М.: Издательство МЭИ, 2006.