

УДК 536.423

**ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ ВСКИПАНИЯ СИЛЬНО ПЕРЕГРЕТОГО Н-ГЕКСАНА В
ПРИСУТСТВИИ СТЕКЛЯННОГО ПОРОШКА**

**STUDY OF BOILING-UP KINETICS OF STRONGLY SUPERHEATED N-HEXANE IN
PRESENCE OF GLASS POWDER**

А.Л. Гурашкин, Г.В. Ермаков

Институт Теплофизики УрО РАН.

Екатеринбург ул Амундсена 106.

nano-Studio@yandex.ru

Аннотация.

Экспериментально исследована кинетика вскипания н-гексана в присутствии стеклянного порошка. Произведено более 5000 измерений. Предложен способ оценки стадии приработки. Установлено, что случайный процесс, приводящий к возникновению жизнеспособного парового пузырька, является нестационарным. Получены изобарическая и изотермические зависимости среднего времени ожидания вскипания от температуры и давления. Произведены сравнения с опытами в чистом капилляре.

Abstract.

The boiling-up kinetics of n-hexane in the presence of a glass powder was studied experimentally. Over 5000 measurements were made. A method has been proposed for estimating the run-in stage. The random process leading to the formation of a viable vapor bubble was found to be nonstationary. Isobaric and isothermal dependences of the average boiling-up latent time on the temperature and the pressure were deduced. The obtained data were compared with results of experiments in a pure capillary.

УДК 536.423

ИЗУЧЕНИЕ КИНЕТИКИ ВСКИПАНИЯ СИЛЬНО ПЕРЕГРЕТОГО Н-ГЕКСАНА В ПРИСУТСТВИИ СТЕКЛЯННОГО ПОРОШКА

А.Л. Гурашкин, Г.В. Ермаков

Институт Теплофизики УрО РАН.

Введение

Процесс кипения активно используется во многих производственных процессах, начиная от пищевой промышленности, кончая энергетикой и созданием космической техники. В большинстве случаев процессы, в которых имеет место кипение, являются энергонапряженными и приводят к перегреву жидкостей, т.е. к возникновению метастабильного состояния жидкостей.

Кинетика вскипания перегретых жидкостей, как правило, исследуется в простых системах, в которых в максимальной степени устранены факторы, инициирующие вскипание. На практике же перегрев жидкостей реализуется в системах, в которых присутствуют флуктуационные центры вскипания, природа которых не ясна до конца, но в которых существенную роль играет присутствие адсорбированного и растворенного газа, а также качество поверхности, ограничивающей перегретую жидкость.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального изучения кинетики вскипания перегретого н-гексана при атмосферном давлении в стеклянной ячейке (объем 0,06 см³), заполненной плотно упакованным порошком из молибденового стекла с размером частиц от 10 до 300 мкм.

Экспериментальная часть

Вскипание перегретой жидкости происходит в результате случайного образования в ней сверхкритического зародыша, способного к детерминированному росту. Информация об этом случайном процессе содержится во временах жизни или, иначе, во временах ожидания вскипания изучаемой жидкости. В эксперименте непосредственно измеряется время жизни

сильно перегретого *n*-гексана методом «пузырьковой камеры». Основным отличием и преимуществом настоящей работы от более ранних работ, выполненных по данной методике [1], является измерение среднего времени ожидания вскипания изучаемой жидкости в заданном метастабильном состоянии, т.е. при установившихся значениях температуры и давления. Такое изменение методики измерений дает возможность не вводить поправки в экспериментальные результаты на релаксацию давления и температуры. Это стало возможно благодаря автоматизации экспериментальной установки на базе персонального компьютера (ПК). Блок схема экспериментальной установки представлена на рис.1.

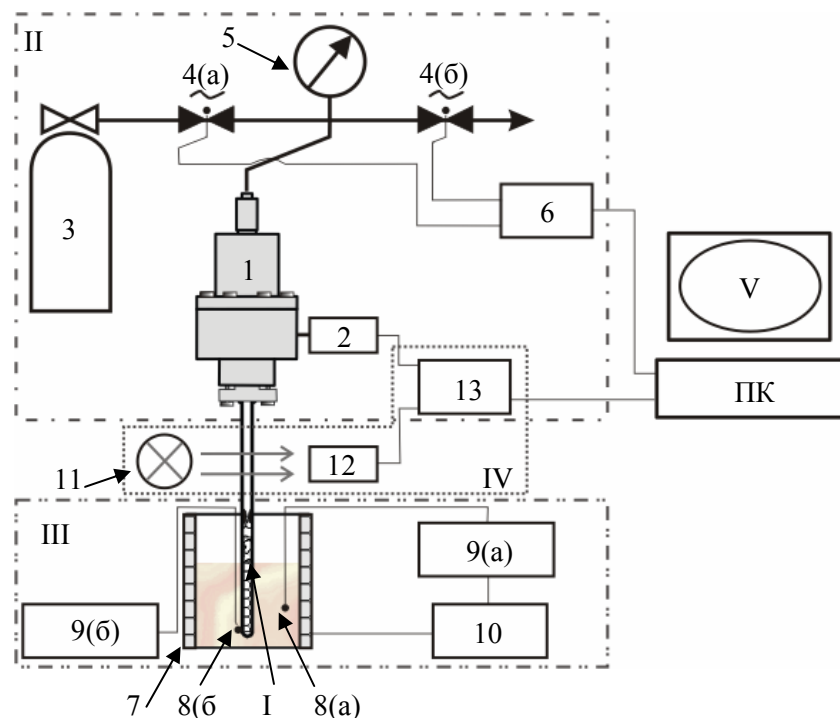


Рис.1. Блок схема экспериментальной установки.

I-измерительная ячейка, II – система создания и поддержания давления: 1 – камера высокого давления, 2 – преобразователь давления, 3 – баллон с углекислотой, 4(a), 4(б) – электроклапаны, 5 – манометр образцовый, 6 – коммутатор; III – система термостатирования и измерения температуры: 7- термостат, 8 (a) – регулирующая термопара, 8(б) – измеряющая термопара, 9 (a) – вольтметр Щ-300, 9 (б) - вольтметр Щ-304-2, 10 - термокон, IV – система измерения и регистрации времени ожидания вскипания жидкости: 11- источник света, 12 – датчик освещенности, 13 – АЦП; V – ПК.

Для перевода исследуемой системы в метастабильное состояние, при температуре термостата (7) T в системе создается давление поджатия p_n , равное 2,0–2,3 МПа. Для

этого включается электромагнитный клапан (4(a)) (см. рис.1) и газ из баллона с углекислотой (3) поступает в камеру высокого давления (1), где через разделительный сильфон давит на измерительную ячейку (I) заполненную н-гексаном. Затем клапан 4(a) закрывается, а клапан 4(б) приоткрывается и происходит сброс давления до заданного значения p' в два этапа с целью уменьшения понижения температуры вследствие адиабатического охлаждения жидкости. Давление сбрасывается сначала до промежуточного значения p_{np} , которое выше давления насыщенных паров жидкости p_s на $0,2 - 0,3 \text{ МПа}$, а затем и до заданного p' . Все эти изменения значений давления поступают на ПК (V) от преобразователя давления (2), расположенного непосредственно в гидравлической части измерительной ячейки (I), через АЦП (13). При достижении заданного значения давления p' на ПК (V) начинается отсчет времени жизни жидкости τ . Момент вскипания фиксируется датчиком освещенности (12) и через АЦП (13) поступает на ПК (V).

Результаты и их обсуждение.

Приработка. Основным измерениям среднего времени ожидания вскипания перегретой жидкости предшествует процесс «приработки» исследуемой системы, который заключался в последовательных вскипаниях исследуемой жидкости в количестве до нескольких сотен и более.

На рис.2 представлена зависимость среднего времени ожидания вскипания н-гексана в системе «н-гексан – стеклянный порошок» от номера серии N , построенная по методу «скользящего среднего» при температуре 418,2К (145°C). Каждая серия состояла из 100 последовательных измерений.

Как мы видим, в процессе приработки происходят колебания среднего времени ожидания вскипания перегретой жидкости около некоторого среднего значения, характеризующего некоторое слабое место. По мере приработки это слабое место разрушается, и процесс вскипания лимитируется другим слабым местом с более высоким значением среднего времени ожидания вскипания. Так, для изучаемой системы, через 650 серий это

среднее значение увеличивается с 3,5 до 11,5 с. Затем еще раз происходит повышение среднего значения времени ожидания.

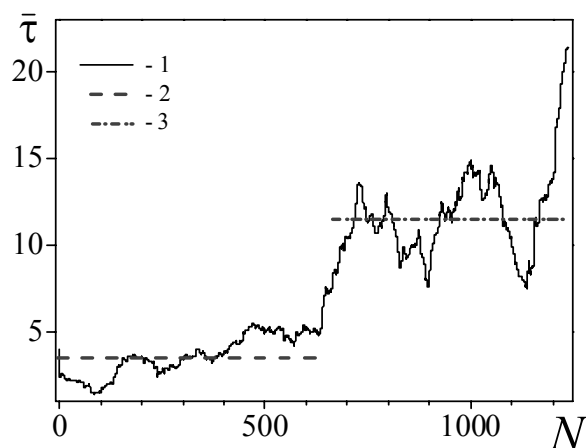


Рис.2. Зависимость среднего времени ожидания вскипания н-гексана от номера серии.
1 – экспериментальная зависимость, 2, 3 – средние значения, около которых происходят колебания.

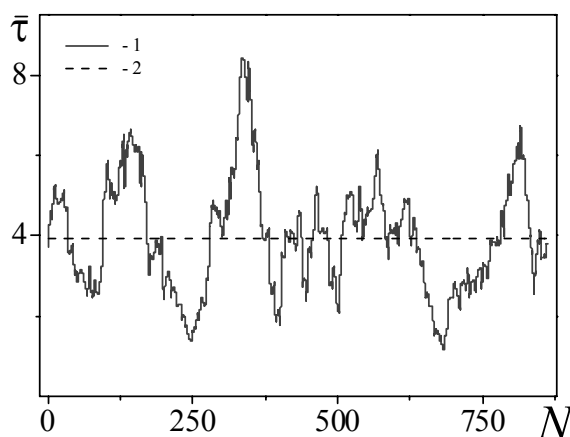


Рис.3. Зависимость среднего времени ожидания вскипания н-гексана от номера серии.
1 – экспериментальная зависимость, 2 – среднее значение, около которого происходят колебания.

После достаточно продолжительной «приработки» среднее время ожидания вскипания перегретой жидкости колеблется около одного значения, происходит температурная стабилизация среднего времени ожидания вскипания и после этого производятся основные измерения.

На рис.3 представлена зависимость среднего времени ожидания вскипания н-гексана в системе «н-гексан – стеклянный порошок» от номера серии, построенная по методу «скользящего среднего» при температуре 446,2К (173°C). Каждая серия состоит из 35 последовательных измерений. В течение всей приработки при данном термодинамическом состоянии системы наблюдаются колебания среднего времени ожидания вскипания перегретой жидкости около величины 4с.

Таким образом, процесс последовательных циклов вскипания - «приработка» - приводит к разрушению флуктуационных центров вскипания (слабых мест) в изучаемой системе, что проявляется в увеличении времени жизни в состоянии перегрева и в стабилизации температуры достижимого перегрева. Количество таких готовых центров кипения тем больше, чем сложнее поверхность. Так для системы «н-гексан – чистая ячейка» приработка составляет 100-200 последовательных циклов вскипания, для системы «н-гексан – стеклянный порошок» до 5000 вскипаний.

Анализ приработки. Ход «приработки» контролируется анализом последовательных выборок по сто измерений времени ожидания вскипания. Для каждой выборки вычисляется среднее время ожидания вскипания, строится гистограмма, затем эмпирическая интегральная функция распределения $F(\tau)$ как отношение номера члена вариационного ряда к числу измерений в зависимости от времени ожидания вскипания. Полученную эмпирическую интегральную функцию распределения сравнивают с экспоненциальным распределением. Плотность распределения вероятностей $f(\tau)$ получают численным дифференцированием интегральной функции распределения.

При наличии интегральной и дифференциальной функций распределения частота зародышеобразования ($\lambda(\tau)$) определяется как функция времени во всей системе [2]:

$$\lambda(\tau) = f(\tau)/(1 - F(\tau)), \quad (1)$$

Во всех случаях, как при «приработке», так и после нее, поток, найденный с помощью (1), оказывается зависящим от времени.

Таким образом, случайный процесс, приводящий к возникновению жизнеспособного парового пузырька, является нестационарным.

Для количественного сравнения нестационарного потока с экспоненциальным, определяемым соотношением:

$$\lambda_{\text{экспо}} = 1/\bar{\tau} = \text{const}, \quad (2)$$

по результатам определения $\lambda(\tau)$ вычислены его средние значения для исследованного промежутка времени:

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{b-a} \int_a^b \lambda(\tau) d\tau \quad (3)$$

Отношение $\bar{\lambda}/\lambda_{\text{экспо}}$ для изучаемой системы изменяется от 0,9 в начале «приработки» до 0,4 в конце. Эта же величина к концу «приработки» для системы н-гексан чистая ячейка составляет 0,7. Наблюдаемые различия между полученными величинами потоков 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 [3] результирующий поток будет близок к экспоненциальному, если в сумме будет более 4 – 5 членов. Таким образом, при «приработке» стеклянного порошка существенная часть флуктуационных центров вскипания была уничтожена (отношения $\bar{\lambda}/\lambda_{\text{экспо}}$ менее 0,6), и плотность распределения существенно отличается от экспоненциальной.

Результаты измерений. На рис.4-7 представлены зависимости средних времен ожидания вскипания перегретого н-гексана от температуры и давления в чистой системе и в присутствии стеклянного порошка.

Из рис.4 видно, что температурная зависимость средних времен жизни для стеклянного порошка близка к зависимости, полученной в «чистых» условиях [4]. Для этой зависимости

характерно наличие крутого, почти вертикального, участка и продолжительного «плато», имеющего слабый наклон.

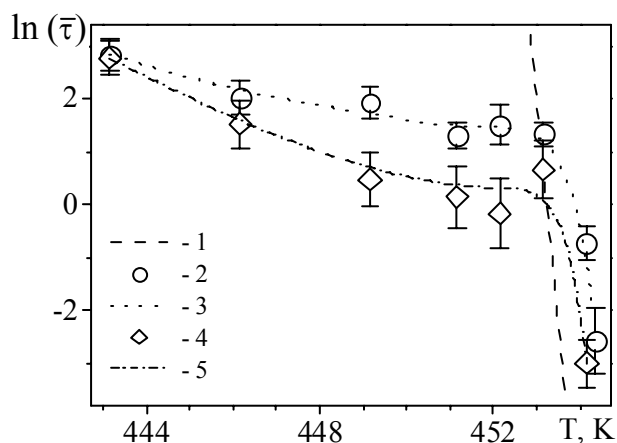


Рис.4. Температурная зависимость среднего времени ожидания вскипания н-гексана при $p' = 1 \text{ атм.}$: 1 – расчет по ТГЗ; 2, 4 – экспериментальные значения для систем «чистая ячейка», «стеклянный порошок» соответственно; 3, 5 - аппроксимация данных 2, 4 соответственно сплайном 5 порядка.

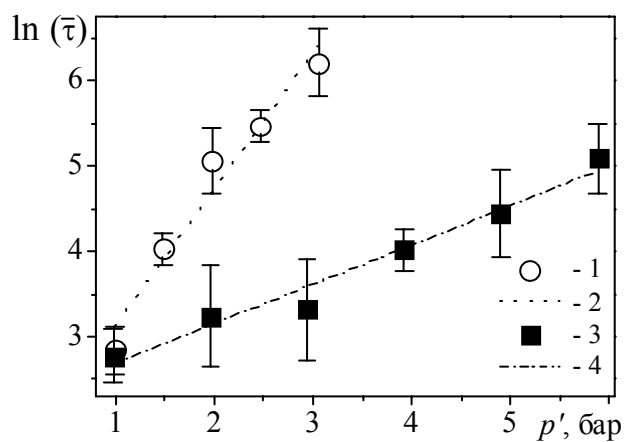


Рис.5. Изотермическая зависимость среднего времени ожидания вскипания н-гексана от избыточного давления p' при 443,2К: 1,3 – экспериментальные данные для систем «чистая ячейка», «жесткая структура, стеклянный порошок» соответственно; 2, 4 – аппроксимация данных 1, 3 линейной функцией методом наименьших квадратов.

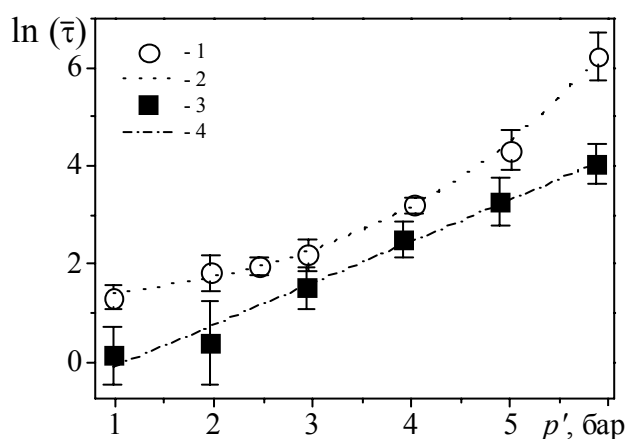


Рис.6. Изотермическая зависимость среднего времени ожидания вскипания н-гексана от избыточного давления p' при 451,2 К: 1,3 – экспериментальные данные для систем «чистая ячейка», «жесткая структура, стеклянный порошок» соответственно; 2, 4 – аппроксимация данных 1, 3 экспоненциальной и линейной функцией соответственно.

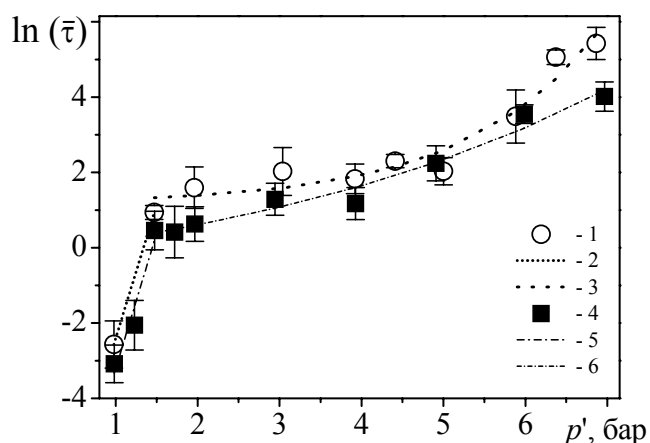


Рис.7. Изотермическая зависимость среднего времени ожидания вскипания н-гексана от избыточного давления p' : 1, 4 – экспериментальные данные для систем «чистая ячейка», «жесткая структура, стеклянный порошок» соответственно; 2, 5 – аппроксимация данных 1, 4 линейной функцией; 3, 6 - аппроксимация данных 1, 4 экспоненциальной функцией.

Из рис. 5-7 видно, что добавление стеклянного порошка в систему качественно не меняет вид изобар, однако количественно приводит к снижению средних времён ожидания вскипания перегретого н-гексана относительно чистых условий.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 07-08-00575-а, и Гранта Президента РФ «Ведущие научные школы» № НШ-4429.2006.8.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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.
- [2] Гурашкин А.Л., Перминов С.А., Ермаков Г.В.. Экспериментальное изучение кинетики вскипания и границы перегрева н-гексана в жестких порошковых структурах. // Теплофизика и аэромеханика, Новосибирск, ИТ СО РАН, 2006, том 13, №4, с. 641-650.
- [3] Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
- [4] Гурашкин А.Л., Ермаков Г.В. Расчет параметров сильно перегретой жидкости в режиме гомогенного и гетерогенного вскипания в чистой стеклянной ячейке // Труды РНКТ-4, МЭИ, 2006, т. 4, с. 71-74.