

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](mailto: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.

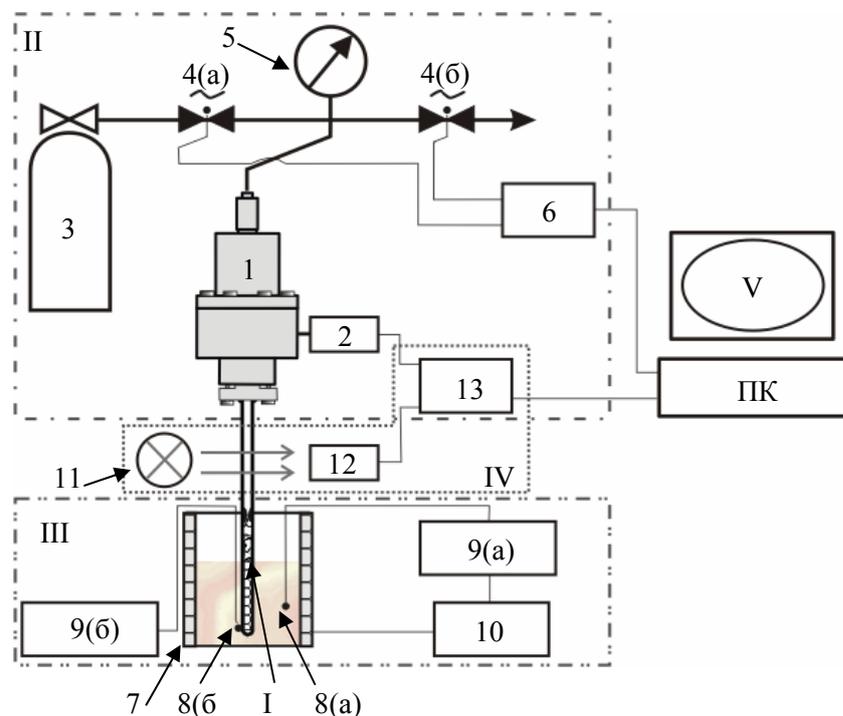
Кинетика вскипания перегретых жидкостей, как правило, исследуется в простых системах, в которых в максимальной степени устранены факторы, инициирующие вскипание. На практике же перегрев жидкостей реализуется в системах, в которых присутствуют флуктуационные центры вскипания, природа которых не ясна до 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 см<sup>3</sup>), 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 (а) – регулирующая термопара, 8(б) – измеряющая термопара, 9 (а) – 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  $\tau$ . Момент вскипания фиксируется датчиком освещенности (12) и через АЦП (13) поступает на ПК (V).

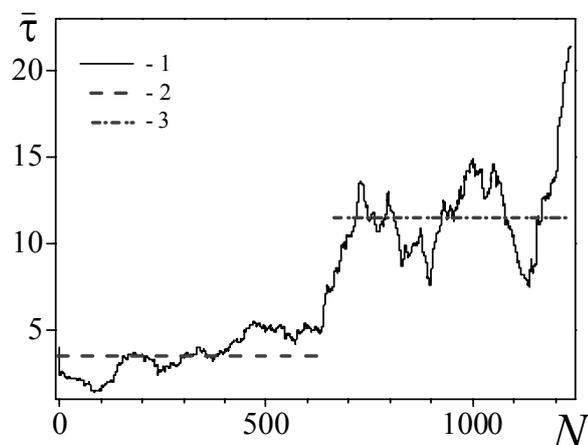
### **Результаты и их обсуждение.**

**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.

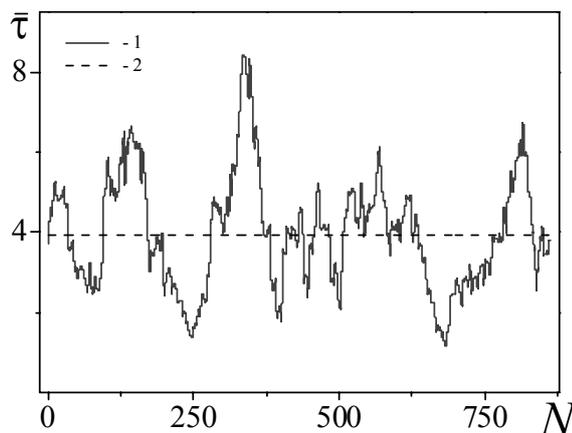
На рис.2 представлена зависимость среднего времени ожидания вскипания н-гексана в системе «н-гексан – стеклянный порошок» от номера серии  $N$ , построенная по методу «скользящего среднего» при температуре 418,2К (145°C). Каждая серия состояла из 100 последовательных измерений.

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:

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

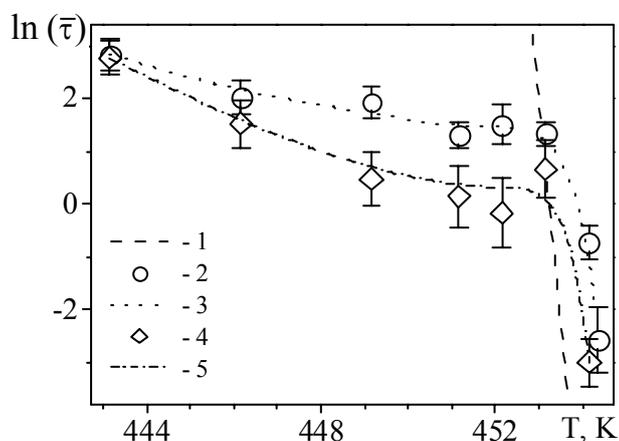
Отношение  $\bar{\lambda}/\lambda_{\text{экспо}}$  для изучаемой системы изменяется от 0,9 в начале «приработки» до 0,4 в конце. Эта же величина к концу «приработки» для системы н-гексан чистая ячейка составляет 0,7. Наблюдаемые различия между полученными величинами потоков можно объяснить следующим 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.

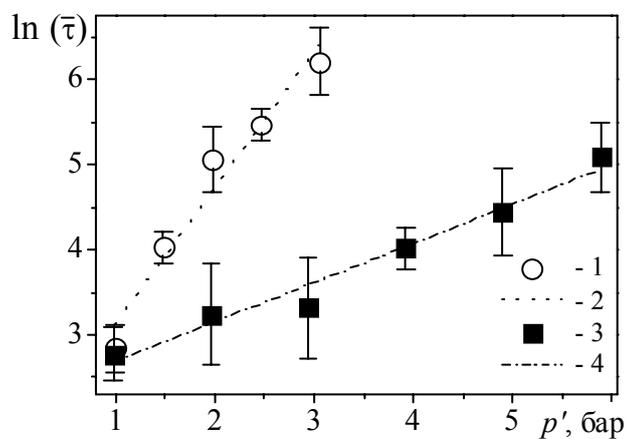
**Результаты измерений.** На рис.4-7 представлены зависимости средних времен ожидания вскипания перегретого н-гексана от температуры и давления в чистой системе и в присутствии стеклянного порошка.

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

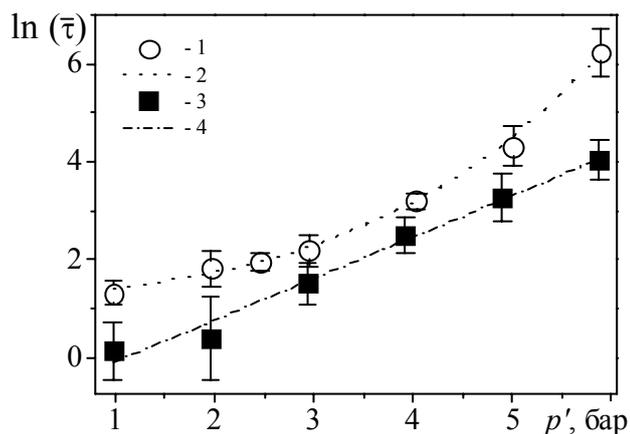
характерно наличие крутого, почти вертикального, участка и продолжительного «плато», имеющего слабый наклон.



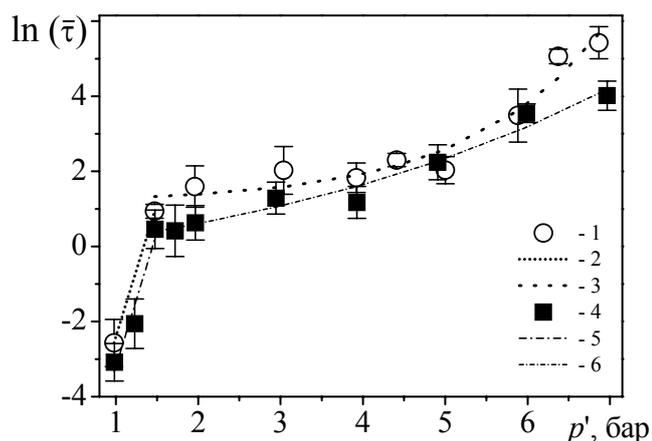
**Рис.4. Температурная зависимость среднего времени ожидания вскипания н-гексана при  $p' = 1 \text{ атм.}$ : 1 – расчет по ТГЗ; 2, 4 – экспериментальные значения для систем «чистая ячейка», «стеклянный порошок» соответственно; 3, 5 - аппроксимация данных 2, 4 соответственно сплайном 5 порядка.**



**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.