

УДК 536.423

## Изучение центров вскипания *n*-пентана с помощью скоростной видеосъемки в двух взаимно перпендикулярных направлениях\*

Е.В. Липнягов, М.А. Паршакова, **Г.В. Ермаков**

*Институт теплофизики УрО РАН, Екатеринбург*

E-mail: parmari@yandex.ru

В статье представлен эксперимент по вскипанию перегретого *n*-пентана в стеклянном капилляре при атмосферном давлении с использованием скоростной видеосъемки. Видеосъемка впервые осуществлялась в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Наличие двух таких изображений позволяет судить о том, с какой стороны стенки сосуда формируется пузырек, наблюдаем ли мы один пузырек с изображением, деформированным из-за кривизны капилляра, или два пузырька, расположенные рядом. Полученные данные указывают на поверхностный (гетерогенный) характер вскипания.

**Ключевые слова:** перегрев, зародышеобразование, вскипание, пузырьки, видеосъемка, *n*-пентан.

### Введение

Кипение жидкости — физическое явление, относящееся к фазовым переходам первого рода и часто возникающее во многих производственных процессах. Это явление может сопровождаться метастабильным состоянием термодинамической системы — перегревом [1–3]. Дискретный характер фазового перехода жидкость–пар проявляется в том, что этот процесс начинается не во всем объеме сразу, а на так называемых флуктуационных центрах вскипания. Иными словами, в жидкости за счет флуктуаций появляются пузырьки пара. Достаточно большие пузырьки растут, а слишком маленькие, размер которых меньше критического, схлопываются. Видеосъемка позволяет обнаружить места, на которых образуются жизнеспособные зародыши новой фазы и, тем самым, получить дополнительную информацию о данном процессе. К примеру, в работе [4] с помощью скоростной видеосъемки исследовалось вскипание сильно перегретых органических жидкостей и воды на трубке из нержавеющей стали в условиях квазистационарного нагрева в большом объеме.

### 1. Методика измерений

На рис. 1 представлена блок-схема экспериментальной установки, снабженная системой зеркал, которая позволяет одной видеокамерой фиксировать вскипание с двух взаимно перпендикулярных направлений. Для этого необходимо, чтобы два таких

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 10-08-00540-а) и программы совместных исследований УрО и ДО РАН (проект № 12-с-2-1013).

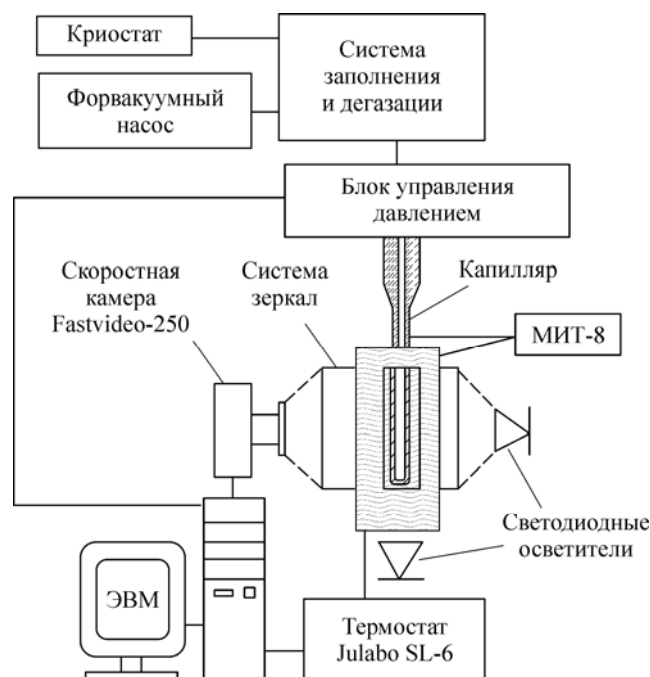


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки.

изображения располагались в одной плоскости, достаточно близко друг к другу. Реализуется это, как видно из рис. 2, с помощью трех зеркал. Два зеркала поворачивают горизонтальный и вертикальный пучки на  $90^\circ$ . Третье зеркало, расположенное вблизи повернутого горизонтального пучка, поворачивает повернутый вертикальный пучок еще на такой же угол и делает параллельным повернутому горизонтальному пучку. Для улучшения качества изображения используются светодиодные осветители. Изображения, получаемые представленным способом от видеокамеры Fastvideo-250, захватываются в реальном времени, автоматически записываются и обрабатываются комплексом программ на ЭВМ. Время экспозиции кадра при видеосъемке остается постоянным, имеет максимально возможное значение, задаваемое управляющей программой в зависимости от выставяемой частоты видеосъемки.

Измерения проводятся методом чистой пузырьковой камеры [1, 5, 6]. Интересным усовершенствованием данного метода может быть использование оптоволоконного датчика для наблюдения за начальной стадией вскипания, как впервые было проделано в работе [7]. Вначале исследуемая жидкость дегазируется. С этой целью н-пентан помещается в резервуар, соединенный посредством трубок и вентилях с системой вакуумирования и с капилляром (см. рис. 1). Резервуар подключен к криостату для охлаждения и снабжен нагревательными элементами для возврата к комнатной температуре. Дегазация происходит с помощью охлаждения и последующего вакуумирования резервуара, а затем, с помощью нагревания, стеклянный капилляр заполняется парами дегазированного н-пентана.

После отсечения вентилем от системы заполнения и дегазации капилляр помещается в термостатирующую ячейку, имеющую смотровые окна для контроля и скоростной видеосъемки эксперимента. Термостатирующая ячейка соединена с циркуляционным термостатом Julabo SL-6. Предварительно были проведены контрольные измерения с помощью многоканального прецизионного измерителя температур МИТ-8. Из них следует, что разница температур между исследуемой областью капилляра и термостатом в рабочем диапазоне температур  $110\text{--}150^\circ\text{C}$  не превышает  $0,01\text{--}0,03^\circ\text{C}$  за счет очень хорошей теплоизоляции трубопроводов, подводящих и отводящих теплоноситель от термостатирующей ячейки и самого капилляра.

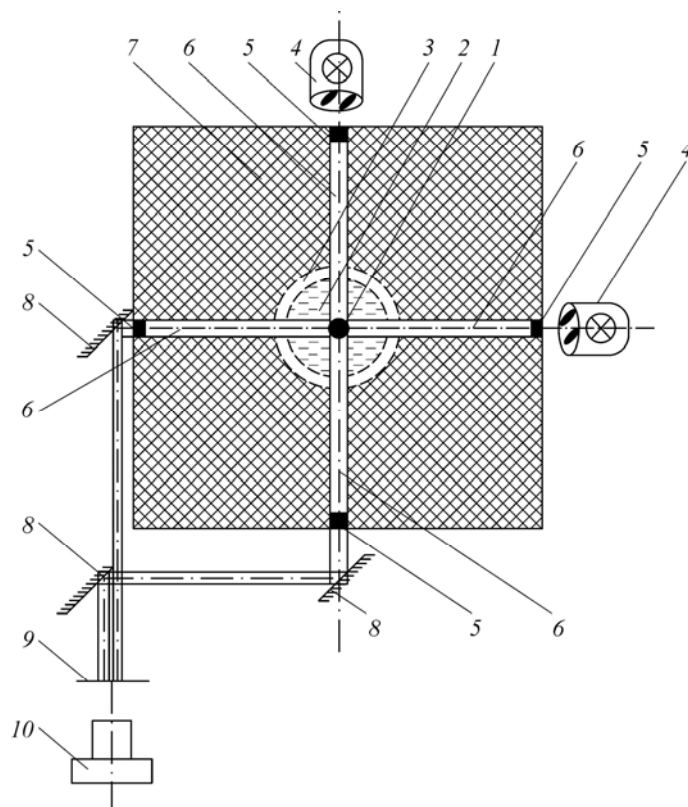


Рис. 2. Схема приведения двух взаимно перпендикулярных изображений вскипания перегретой жидкости в одну плоскость.

1 — капилляр с исследуемой жидкостью, 2 — теплоноситель, 3 — корпус проточного термостата, 4 — осветитель, 5 — окна, 6 — световоды, 7 — теплоизоляция, 8 — зеркала, 9 — рассматриваемые изображения, приведенные в одну плоскость, 10 — скоростная видеокамера.

Эксперимент, в котором измеряется среднее время жизни перегретого состояния, состоит, как и предварительная «приработка» поверхности, из серий повторяющихся событий. Цикл начинается с выдержки системы под давлением порядка 20 бар, которое значительно превышает давление насыщенных паров при заданной температуре. В этот момент происходит разрушение готовых центров парообразования, растворение парогазовых пузырьков в жидкости. Необходимое метастабильное состояние *n*-пентана достигается снижением давления на жидкость от исходного значения 20 бар до давления насыщенных паров при той же температуре и ниже вплоть до заданного значения (1 атм.). С этой целью установка оборудована баллоном с углекислым газом, соединенным через редуктор давления с системой электромагнитных клапанов фирмы Danfoss. Автоматическое управление клапанами, контроль и измерение давления осуществляются программным комплексом благодаря реостатному датчику Сапфир-22. Капилляр соединен с описанным выше блоком управления давлением через разделительный сильфон. Отсчет времени при измерении начинается после установления в системе равновесия по давлению и температуре. В этот же момент времени включается запись видеосъемки. После вскипания система возвращается в исходное состояние и измерение повторяется.

По полученным видеокдрам в некоторых случаях можно измерить координаты первого различимого зародыша, т. е. проекции  $r_x$  и  $r_y$ , радиус-вектора  $\mathbf{r}$  на координатные оси в плоскости, перпендикулярной оси капилляра. В проходящем свете, параллельном оси объектива, получается проекция на ось  $x$ , а в перпендикулярном — на ось  $y$  (см. рис. 3).

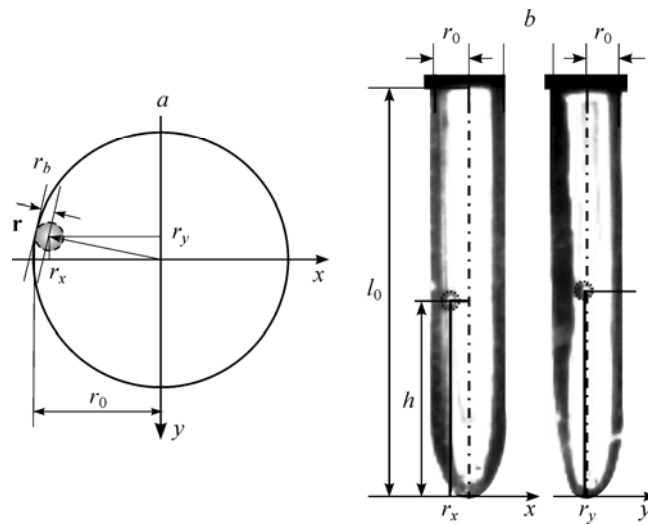


Рис. 3. Первый видимый пузырек в трех плоскостях.

$a$  — рисунок сечения по высоте, на которой возник пузырек,  $b$  — изображения видеосъемки в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Знак проекции определяется положением зародыша относительно оси капилляра (или квадрантом, в котором он находится). На кадре также можно определить расстояние от оси капилляра до центра зародыша  $r_0$  и радиус зародыша  $r_b$ . Картинка имеет некоторое увеличение. Перейти к истинным размерам проекций  $R_x$  и  $R_y$  и пузырька  $R_b$  можно с помощью формул

$$R_x = R_0 r_x / r_0, \quad R_y = R_0 r_y / r_0, \quad R_b = R_0 r_b / r_0 \quad (1)$$

с привязкой к истинному внутреннему радиусу капилляра  $R_0$ , который замеряется заранее несколькими способами, в том числе измерительным микроскопом. Аналогичным образом определяется и высота положения центра зародыша  $h$ . Для привязки в этом случае используется внутренняя видимая длина капилляра  $L_0$ . Высоту, на которой находится центр пузырька, можно рассчитать по формуле, аналогичной (1):

$$H = L_0 h / l_0. \quad (2)$$

Корень квадратный из суммы квадратов проекций совместно с радиусом пузырька  $R_b$  дает расчетный внутренний радиус капилляра  $R$

$$R = R_b + \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (3)$$

при условии, что пузырек находится на внутренней стенке капилляра. Предполагается, что форма пузырька на начальной стадии роста близка к форме сферического гомогенного зародыша в связи с тем, что *n*-пентан хорошо смачивает стеклянную поверхность капилляра [8].

Расчетная величина  $R$  даже при соблюдении упомянутых условий может отличаться от истинного внутреннего радиуса  $R_0$ . Их относительная разница определяет погрешность определения радиуса капилляра по формуле (3) и во многом зависит от возможностей видеокамеры. Увеличение сканируемой площади означает неизбежное снижение частоты видеосъемки. Это приводит к тому, что первый видимый зародыш довольно часто представляет собой уже сильно выросший пузырек не всегда правильной формы, с кавернами.

Увеличивается погрешность измерений параметров пузырька. Уменьшение радиуса и длины капилляра, оптимальная регулировка системы зеркал могут сократить сканируемую площадь, повысить частоту съемки и, в итоге, снизить погрешность измерений до приемлемого уровня.

## 2. Результаты измерений

Предварительные измерения показали, что в нашем эксперименте стеклянный капилляр имеет внутренний диаметр  $D_0 = 2,45 \pm 0,05$  мм и длину наблюдаемой области  $L_0 = 15 \pm 0,5$  мм. По этим данным найден истинный внутренний радиус капилляра  $R_0 = 1,23$  мм и объем рабочей области  $V_0 = 7 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>. В ходе эксперимента были произведены несколько серий измерений при разных температурах, получен обширный видеоматериал. Анализ видеофайлов показал, что при низких температурах можно найти кадры, для которых форма зародышей пара с хорошим приближением может быть описана как сферическая. Некоторые кадры, на которых впервые появляются пузырьки такой формы, представлены на рис. 4. Характеристики пузырьков, найденные по этим кадрам, сведены в таблицу. Порядковые номера в таблице соответствуют номерам на рис. 4.

При расчетах высоты появления пузырька для минимизации погрешности использовалась только левая проекция. По ней же рассчитывалась координата  $R_x$ . По правой проекции с более сильными оптическими искажениями рассчитывалась только координата  $R_y$ . Разница изображений объясняется следующим. Конструктивная особенность крепления капилляра такова, что его реальная ось может оказаться, как в представленном эксперименте, под небольшим наклоном к воображаемой оси. Попытки улучшить положение сопряжены с серьезным риском поломки капилляра из-за хрупкости стекла. В результате одна из проекций (в данном случае левая) получается с минимальными оптическими искажениями, вторая проекция (правая) оказывается несколько вытянутой из-за первоначального наклона в пределах градуса.

Относительная погрешность радиуса капилляра, рассчитанного по формуле (3), для обработанного массива измерений не превышает 1 %, что находится в пределах погрешности прямого измерения этой величины. Вместе с тем следует принять во внимание, что получаемые изображения капилляра, в особенности правое на кадре, имеют искажения. Внутренняя граница капилляра несколько размыта, что обусловлено техническим пределом скоростной видеосъемки. За увеличение частоты смены кадров и более детальную развертку процесса во времени приходится расплачиваться уменьшением времени экспозиции кадра, а чем оно меньше, тем меньшее количество света получает видеокамера и тем хуже изображение. Все это вносит некоторый произвол при определении входящих в расчет величин и увеличивает фактическую погрешность. Тем не менее, на основе проведенных расчетов можно утверждать, что пузырьки рождаются на внутренней поверхности капилляра, и их форма на начальной стадии роста близка к форме сферического гомогенного зародыша. Поскольку *n*-пентан хорошо смачивает стекло, это подтверждает исходное предположение о поверхностном механизме вскипания.

Видеосъемка в двух взаимно перпендикулярных проекциях проводилась с частотой  $f = 2400$  кадров в секунду, что соответствует времени между кадрами  $f^{-1} = 0,42$  мс. Время экспозиции кадра составляет 0,4 мс. По кадрам с первым видимым пузырьком (см. рис. 4) была сделана грубая по порядку величины оценка скорости его роста  $\dot{R}_b$  :

$$\dot{R}_b \approx R_b f = 2400 R_b. \quad (4)$$

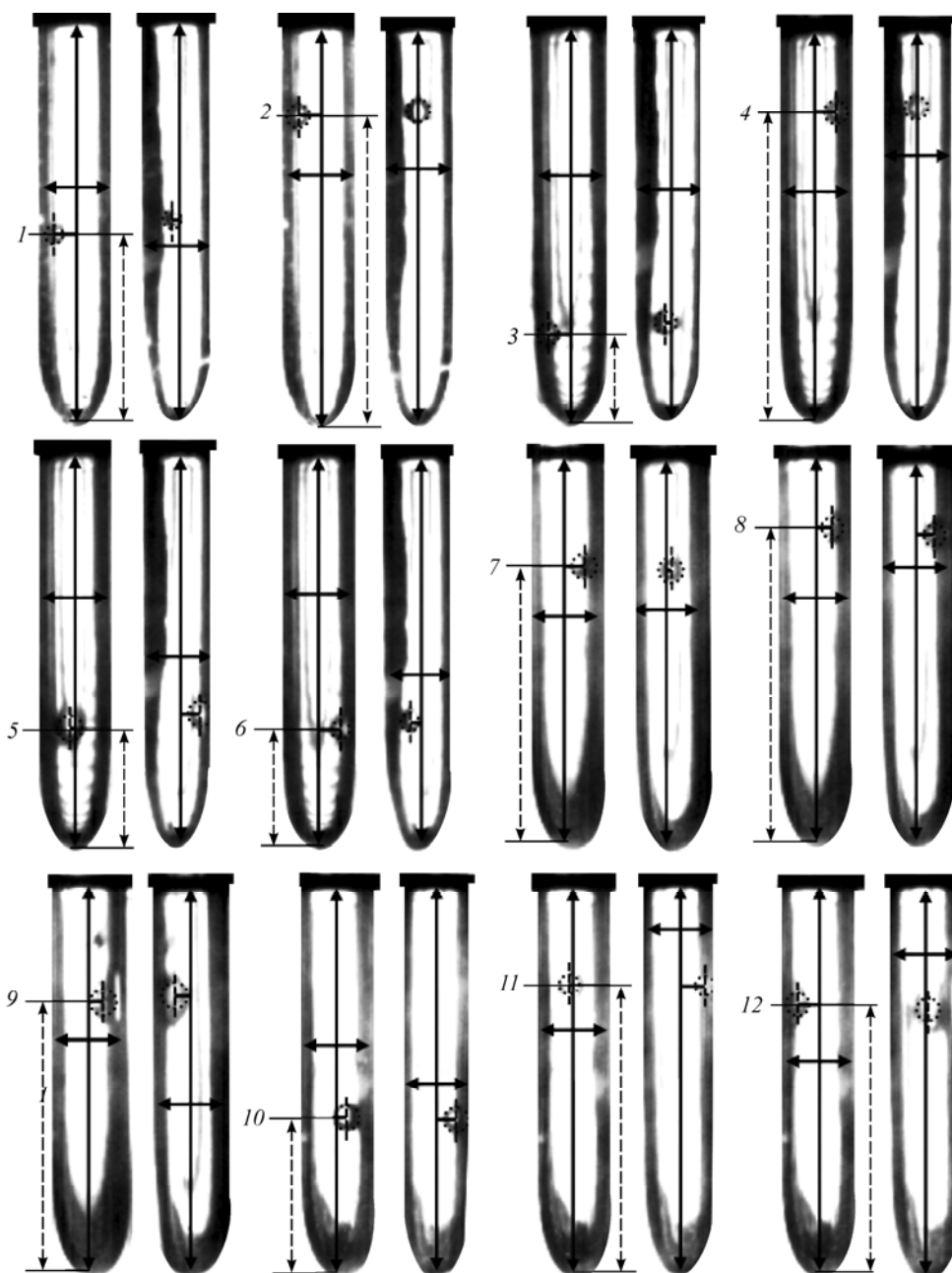


Рис. 4. Выборочные кадры скоростной видеосъемки вскипания перегретого н-пентана при атмосферном давлении и разных температурах в двух взаимно перпендикулярных направлениях с первым видимым сферическим пузырьком при частоте 2400 кадров в секунду.

1, 2 — 110 °С, 3–6 — 120 °С, 7–9 — 125 °С, 10–12 — 130 °С.

Как видно из таблицы, эта величина имеет порядок 0,8–1,2 м/с, что на один порядок меньше скорости роста парового пузырька паров сильно перегретого бензола ( $T_S = 313$  К,  $T_w - T_S = 161$  К) на трубке диаметром 2,5 мм из нержавеющей стали [4],  $T_S$  и  $T_w$  — температуры насыщенных паров и стенки, соответственно. Для более точной оценки скорости необходимо больше кадров, иллюстрирующих рост сферических пузырьков, т. е. более высокая частота видеосъемки.

Таблица

Параметры первого видимого пузырька в стеклянном капилляре с  $R_0 = 1,23$  и  $L_0 = 15$  мм

| №  | $T, ^\circ\text{C}$ | $H, \text{мм}$ | $R_x, \text{мм}$ | $R_y, \text{мм}$ | $R_b, \text{мм}$ | $\dot{R}_b, \text{м/с}$ | $R, \text{мм}$ | $ R - R_0/R_0 , \%$ |
|----|---------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|-------------------------|----------------|---------------------|
| 1  | 110                 | 7,1            | -0,86            | -0,25            | 0,34             | 0,8                     | 1,234          | 0,3                 |
| 2  | 110                 | 11,8           | -0,80            | 0                | 0,43             | 1,0                     | 1,230          | 0                   |
| 3  | 120                 | 3,5            | -0,80            | -0,25            | 0,40             | 1,0                     | 1,236          | 0,5                 |
| 4  | 120                 | 12,0           | +0,80            | 0                | 0,43             | 1,0                     | 1,230          | 0                   |
| 5  | 120                 | 4,5            | -0,18            | +0,74            | 0,46             | 1,1                     | 1,222          | 0,7                 |
| 6  | 120                 | 4,4            | +0,80            | -0,37            | 0,34             | 0,8                     | 1,219          | 0,9                 |
| 7  | 125                 | 10,7           | +0,74            | +0,25            | 0,46             | 1,1                     | 1,239          | 0,7                 |
| 8  | 125                 | 12,3           | +0,55            | +0,62            | 0,40             | 1,0                     | 1,227          | 0,2                 |
| 9  | 125                 | 10,4           | +0,49            | -0,55            | 0,49             | 1,2                     | 1,233          | 0,2                 |
| 10 | 130                 | 6,0            | +0,37            | +0,68            | 0,46             | 1,1                     | 1,232          | 0,2                 |
| 11 | 130                 | 11,2           | -0,12            | +0,86            | 0,34             | 0,9                     | 1,239          | 0,7                 |
| 12 | 130                 | 10,3           | -0,80            | +0,12            | 0,43             | 1,0                     | 1,239          | 0,8                 |

Другие результаты видеосъемки в двух взаимно перпендикулярных направлениях представлены на рис. 5. На кадрах видно, как с ростом времени и с приближением межфазной поверхности к противоположной стенке спокойный характер роста пузырька меняется. На поверхности растущего парового зародыша появляются вторичные пузыри, что характерно для пленочного кипения [9]. При рассмотрении большинства видеофайлов, полученных вблизи границы перегрева для изучаемого капилляра, возникает впечатление, что вдоль стенки капилляра быстро образуется паровая пленка, минуя стадию пузырькового кипения.

На рис. 6 показана зависимость логарифма среднего времени жизни перегретого *n*-пентана от температуры для капилляра с  $D_0 = 2,45$  мм и объемом рабочей области  $V_0 = 7 \times 10^{-8}$  м<sup>3</sup>. Там же представлены данные для стеклянных капилляров с  $D_0 = 1, 1,2, 1,4, 2,4$  и  $7$  мм [1, 10–13]. Оказалось, что температура на границе достижимого перегрева для капилляра с  $D_0 = 2,45$  мм близка к значению для капилляра с  $D_0 = 7$  мм и приблизительно на 8 градусов меньше максимального значения, достигнутого на более узких капиллярах. Отметим, что для капилляра фактически с тем же диаметром  $D_0 = 2,4$  мм эта разница составляет 2 градуса. Чуть меньший “недогрев” (1,5 градуса) получен для капилляра с  $D_0 = 1,2$  мм, в то время как кривые для капилляров с  $D_0 = 1$  и  $1,4$  мм фактически совпадают. Такой количественный разброс демонстрирует трудность воссоздания условий эксперимента. Он может быть обусловлен различием иницирующих свойств поверхности капилляра, попаданием на дно сосуда трудноудаляемой газонасыщенной грязи, разным содержанием летучих компонентов в жидкости и т. п. Давно известно, что длительное хранение незащищенных капилляров при последующем вскипании в них жидкости приводит к снижению перегрева, в то время как в свежевытянутых и прокаленных капиллярах достигаются наибольшие перегревы [14]. Все это лишний раз подчеркивает гетерогенный характер вскипания.

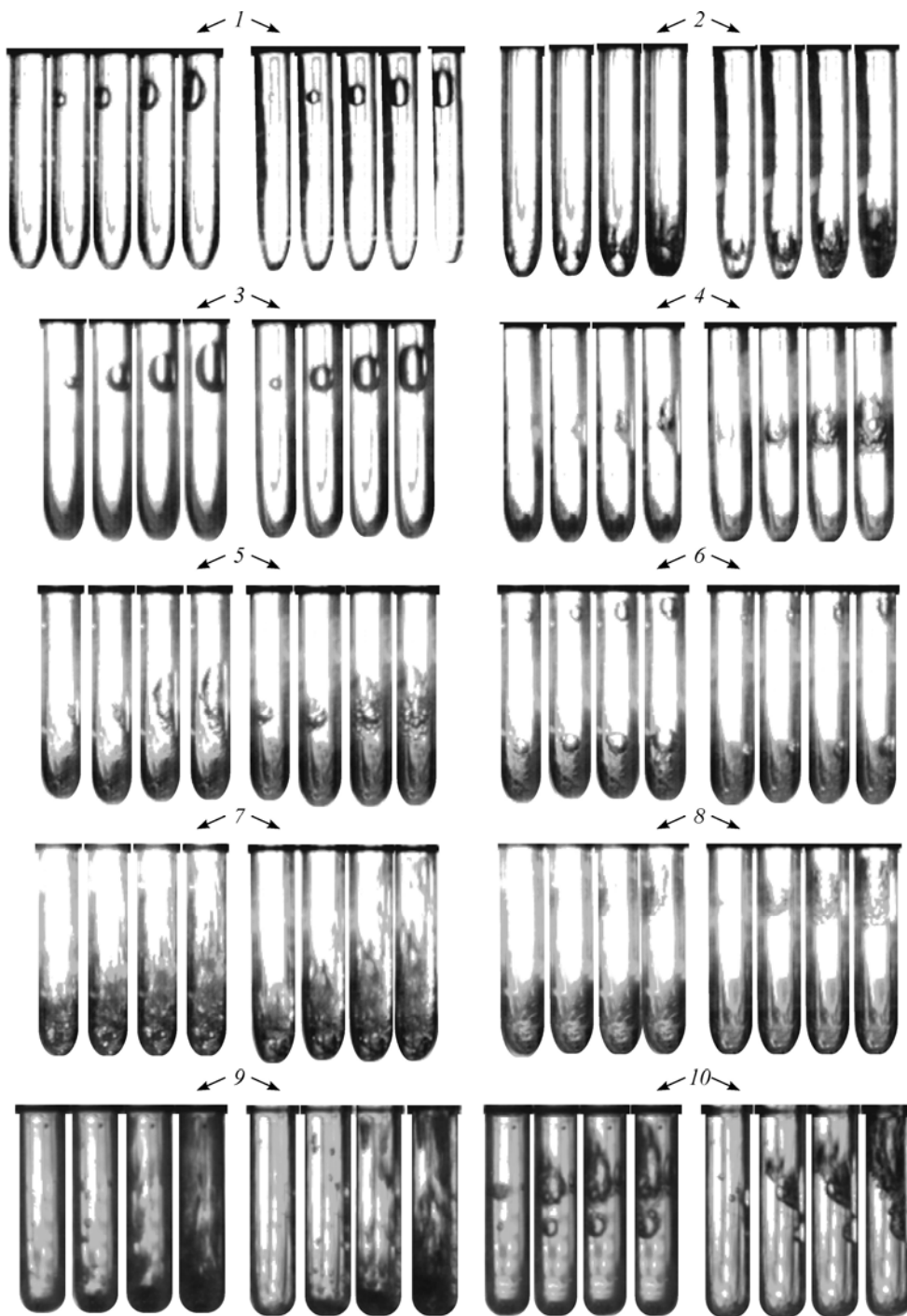


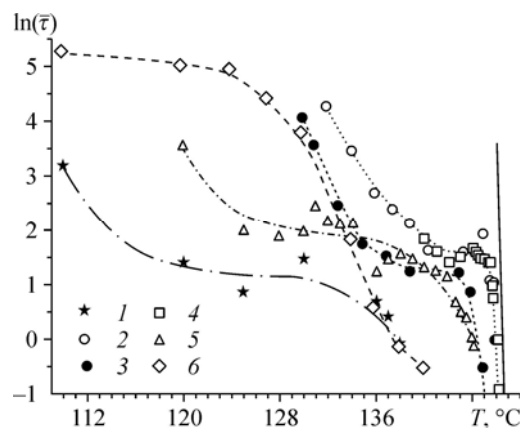
Рис. 5. Типичные кадры скоростной видеосъемки вскипания перегретого н-пентана при атмосферном давлении и разных температурах в двух взаимно перпендикулярных направлениях при частоте 2400 кадров в секунду.

1 — 110 °С, 2 — 120 °С, 3 — 125 °С, 4 — 130 °С, 5–6 — 136 °С, 7–8 — 137 °С, 9–10 — 138 °С.



Рис. 6. Зависимость среднего времени жизни перегретого н-пентана в стеклянном капилляре от температуры при атмосферном давлении.

Символы — эксперимент, сплошная линия — гомогенная граница для 2; 1 —  $V_0 = 7 \times 10^{-8} \text{ м}^3$ ,  $D_0 = 2,45 \text{ мм}$ , 2 —  $V_0 = 3 \times 10^{-8} \text{ м}^3$ ,  $D_0 = 1 \text{ мм}$  [1], 3 —  $V_0 = 6 \times 10^{-8} \text{ м}^3$ ,  $D_0 = 1,2 \text{ мм}$  [10], 4 —  $V_0 = 10 \times 10^{-8} \text{ м}^3$ ,  $D_0 = 1,4 \text{ мм}$  [11], 5 —  $V_0 = 13,5 \times 10^{-8} \text{ м}^3$ ,  $D_0 = 2,4 \text{ мм}$  [12], 6 —  $V_0 = 270 \times 10^{-8} \text{ м}^3$ ,  $D_0 = 7 \text{ мм}$  [13].



### Заключение

В работе представлен эксперимент по вскипанию н-пентана при атмосферном давлении в стеклянном капилляре с использованием скоростной видеосъемки в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Наличие двух таких изображений картины вскипания позволяет определить координаты первого видимого пузырька на стенке капилляра, а значит, получить дополнительную информацию о центрах парообразования. Точность измерений зависит от возможностей видеокамеры. Оказалось, что при низких температурах на кадрах можно найти пузырьки, форма которых с хорошим приближением описывается сферой. Сделан вывод, что такие пузырьки располагаются вблизи внутренней поверхности капилляра. На кадрах при более высоких температурах видно, как на поверхности парового зародыша образуются вторичные пузырьки. Непосредственно вблизи границы перегрева для исследуемого капилляра в большинстве реализаций вскипания происходит формирование паровой пленки без стадии пузырькового кипения. Полученные данные позволяют говорить о поверхностном характере зародышеобразования.

### Список литературы

1. Скрипов В.П., Сеницын Е.Н., Павлов П.А., Ермаков Г.В., Муратов Г.Н., Буланов Н.В., Байдаков В.Г. Теплофизические свойства жидкостей в метастабильном состоянии: справочник. М.: Атомиздат, 1980. 208 с.
2. Debenedetti P.G. Metastable liquids. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1996. 411 p.
3. Ермаков Г.В. Термодинамические свойства и кинетика вскипания перегретых жидкостей. Екатеринбург: УрО РАН, 2002. 272 с.
4. Актёршев С.П., Овчинников В.В. Модель вскипания сильно перегретой жидкости с формированием фронта испарения // Теплофизика и аэромеханика. 2011. Т. 18, № 4. С. 617–628.
5. Ермаков Г.В., Липнягов Е.В., Перминов С.А. Изучение характера вскипания жидкости вблизи границы ее достижимого перегрева // ТВТ. 2001. Т. 39, № 6. С. 889–896.
6. Байдаков В.Г., Каверин А.М., Андбаева В.Н. Вскипание жидкого аргона при больших перегревах в слабых ультразвуковых полях // Теплофизика и аэромеханика. Т. 18, № 1. 2011. С. 35–40.
7. Gurashkin A.L., Starostin A.A., Ermakov G.V., Skripov P.V. High speed optical investigations of a character of boiling-up onset // J. Chem. Phys. 2012. Vol. 136, No. 2. P. 021102.
8. Зимон А.Д. Адгезия жидкости и смачивание. М.: Химия, 1974. 416 с.
9. Несис Е.И. Кипение жидкостей. М.: Наука, 1973. 280 с.
10. Ermakov G.V., Lipnyagov E.V., Perminov S.A., Gurashkin A.L. Heterogeneous boiling-up of superheated liquid at achievable superheat threshold // J. Chem. Phys. 2009. Vol. 131, No. 3. P. 031102.
11. Сеницын Е.Н., Усков В.С. Вскипание перегретой жидкости в присутствии металлической поверхности в изотермических условиях // ИФЖ. 1983. Т. 44, № 1. С. 19–21.

12. Липнягов Е.В., Паршакова М.А., Ермаков Г.В. Изучение вскипания перегретого н-пентана в стеклянном капилляре в зависимости от температуры по данным скоростной видеосъемки. // Тр. XIV Минского межд. форума по тепло- и массообмену, 10-13 сентября, 2012. Т. 1, ч. 2, С. 537–540.
13. Падерин И.М., Усков В.С., Ермаков Г.В., Кинетика вскипания перегретой жидкости в присутствии пористой и гладкой поверхностей // ТВТ. 1994. Т. 34, № 6. С. 863–866.
14. Kenrick F.B., Gilbert C.S., Wismer K.L. The superheating of liquids // J. Phys. Chem. 1924. Vol. 28, No. 12. P. 1297–1307.

*Статья поступила в редакцию 17 октября 2012 г.*