

4. Nakamura Y., Katsuki R., Yokomori T., Ohmura R., Takahashi M., Iwasaki T., Uchida K., Ueda T., Combustion characteristics of methane hydrate in a laminar boundary layer. // *Energy & Fuels*. – 2009. – 23. – P. 1445–1449.
5. Nakoryakov V.E, Misyura S.Ya., Elistratov S. L., Manakov A.Yu., Shubnikov A.E., Combustion of Hydrates // *Journal of Engineering Thermophysics*. – 2013. – V. 22. – № 2. – P. 1–6.
6. Истомина В.А., Якушев В.С. Газовые гидраты в природных условиях. – М.: Недра, 1992. – 236 с.
7. Yakushev V.S., Istomin V.A., Physics and Chemistry of Ice // Hokkaido University Press, Sapporo. – 1992. – P. 136.
8. Zhang G., Rogers R.E., Ultra-stability of gas hydrates at 1 atm. and 268,2K // *Chemical Engineering Science*. – 2008. – 63. – P. 2066–2074.
9. Kuhs W. F., Genov G., Staykova D. K., Hansen T., Ice perfection and onset of anomalous preservation of gas hydrates // *Phys.Chem.Chem.Phys*. – 2004. – 6. – P. 4917–4920.

УДК 536.423

**ФИЗИКА РОСТА ПУЗЫРЕЙ ПРИ КИПЕНИИ  
ДИСТИЛЛИРОВАННОЙ ВОДЫ НЕДОГРЕТОЙ ДО  
ТЕМПЕРАТУРЫ НАСЫЩЕНИЯ**

Молчуев Е.В.

Томский политехнический университет, г. Томск

E-mail: Chupa04@mail.ru

Практическая значимость процесса кипения в современной науке, технике и технологии, делают актуальным большинство исследований, проводимых по изучению различных теплофизических и гидродинамических аспектов фазовых переходов при кипении чистых жидкостей и их смесей в самом широком диапазоне температур, давлений, режимных параметров, конструктивных особенностей и т. д. Кипение воды обеспечивает чрезвычайно интенсивную теплоотдачу и отвод предельно высоких тепловых потоков как при кипении в большом объеме, так и в условиях вынужденного течения [1].

Спецификой процесса кипения является то, что в процессе фазового перехода (чистой жидкости и их смесей) образуются паровые образования [2]. Этот процесс включает в себя испарение-конденсацию жидкости через паровые пузыри, действующие как миниатюрные тепловые трубки, и стимулированный этими периодически возникающими и схлопывающимися паровыми пузырями турбулентный теплообмен однофазной холодной жидкости с нагретой поверхностью в пространстве между пузырями [2].

Сегодня имеющихся опытных данных и описывающих их расчётных соотношений по поведению паровых пузырей [3, 4], явно недоста-

точно для успешной разработки завершенной, непротиворечивой теории кипения. Поэтому первоочередными задачами на сегодня оказываются скоростные киносъёмки процесса с высоким пространственным и временным разрешением с целью получения новой информации, касающейся размеров пузырьков, динамики роста пузырьков и их взаимодействие с поверхностью нагрева.

С целью решения поставленных задач была создана экспериментальная установка для исследования механизма кипения. На рисунке 1 представлена схема установки, а на рисунке 2 – схема проецирования изображения (схема теневой методики) и визуализации процесса парообразования.

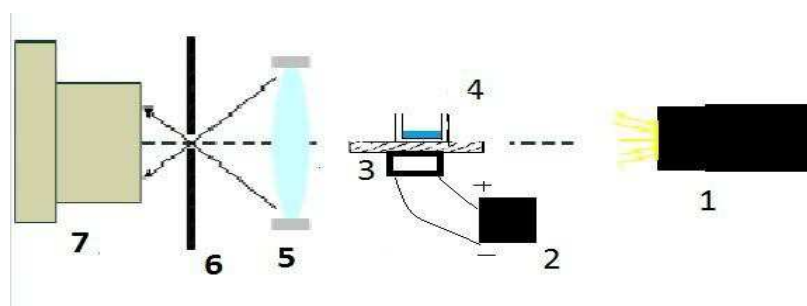


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

- 1 – источник света; 2 – блок питания электронагревателя; 3 – медная пластина и электронагреватель; 4 – кювета (сосуд прямоугольной формы из стекла);  
5 – конденсирующая линза; 6 – непрозрачный щит с отверстием;  
7 – камера с объективом

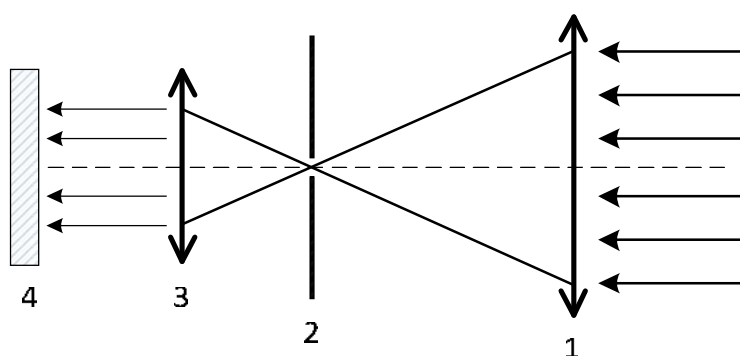


Рис. 2. Система проецирования изображения:

- 1 – конденсирующая линза; 2 – непрозрачный щит с отверстием;  
3 – объектив; 4 – сенсор камеры

Для проецирования изображения на сенсор камеры используется комбинация конденсирующая линза и объектив камеры (см. рис. 2). Плоскопараллельный свет фокусируется на оптической оси линзой 1.

Объектив камеры 3 обратно конвертирует свет в плоскопараллельный. Далее свет попадает на сенсор камеры 4. Представленная система проецирует теневое изображение на сенсор камеры без искажений. Коэффициент увеличения объекта рассчитывается по формуле:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{f_{obj}}{f_c},$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – соответственно размеры области измерений и сенсора камеры;  $f_{obj}$  и  $f_c$  – фокусные расстояния объектива и конденсирующей линзы.

В фокальной плоскости линзы 1 (см. рис. 2) помещается непрозрачный щит с отверстием 2 таким образом, что центр отверстия совмещается с оптической осью системы. В этом случае свет от источника плоскопараллельного света пройдет через щит без искажений. Свет от других источников будет сфокусирован линзой 1 в других областях фокальной плоскости и соответственно будет задержан установленным щитом 2. То есть, только свет, генерируемый специально для измерений, будет зафиксирован сенсором камеры.

В разработанной установке источником тепловыделения является электрический ток. В качестве объектов исследования рассматривались дистиллированная вода. Плотность теплового потока выделяемого спиралью накаливания и непосредственно подведенного к кювете определялось из расчёта недогрева исходной смеси в диапазоне от 85 до 100 °С и составляло (14,8; 26,75; 40,73; 53,57 Вт), что соответствовало недогреву жидкости в пределах 0–15 °С. Причем при последней плотности теплового потока (53,57 Вт), температура жидкости достигала температуры насыщения. Интервал варьирования – 5 °С.

При проведении исследований обеспечивалось неизменность внешних условий с целью минимизации случайных ошибок. Так, например, поддерживалась постоянная начальная температура исходной смеси. Все эксперименты проводились в закрытых отапливаемых помещениях при температуре воздуха 293–298 К (20–25 °С).

Во время экспериментов регистрировались следующие режимные параметры: температура исходной смеси, температура подложки, температура стенки кюветы, тепловой поток выделяемой спиралью накаливания.

Визуализация процесса кипения осуществлялась через фронтальную сторону кюветы (размер 5×2,5 см) с помощью программного обеспечения на ПК. Цифровая скоростная камера Fastvideo-500M позволяет осуществить съёмку с частотой 500 кадр/сек при полноэкранный

ном сканировании (разрешение 1280×1024, 10 бит). Данные с видео сенсора регистрируются контроллером камеры и передаются в фрейм-графбер. И далее записываются напрямую в оперативную память ПК, откуда они выводятся на экран монитора и могут быть сохранены на жёсткий диск. Для анализа экспериментальных данных использовалась программа Drop Shape Analysis, разработанная исследовательским центром микрогравитации Свободного университета, Брюссель, Бельгия.

На кадрах практически не прослеживаются постоянно действующие центры парообразования, и расположение на поверхности нагрева большинства центров парообразования носит случайный (хаотический) характер. В связи с этим был выделен участок поверхности нагрева путём последовательных серий типичных экспериментов, где наблюдался рост паровых образований.

Экспериментальные исследования проводились с разным количеством жидкости от 5 мл до 15 мл, с интервалом 5 мл. Принципиального отличия в размерах паровых пузырьков от объёма исследуемой жидкости не обнаружилось.

В ходе обработки экспериментальных данных были построены графические зависимости диаметра основания и высоты паровых образований в момент отрыва от плотности теплового потока при данных значениях недогрева исходной смеси (см. рис. 3, рис. 4).

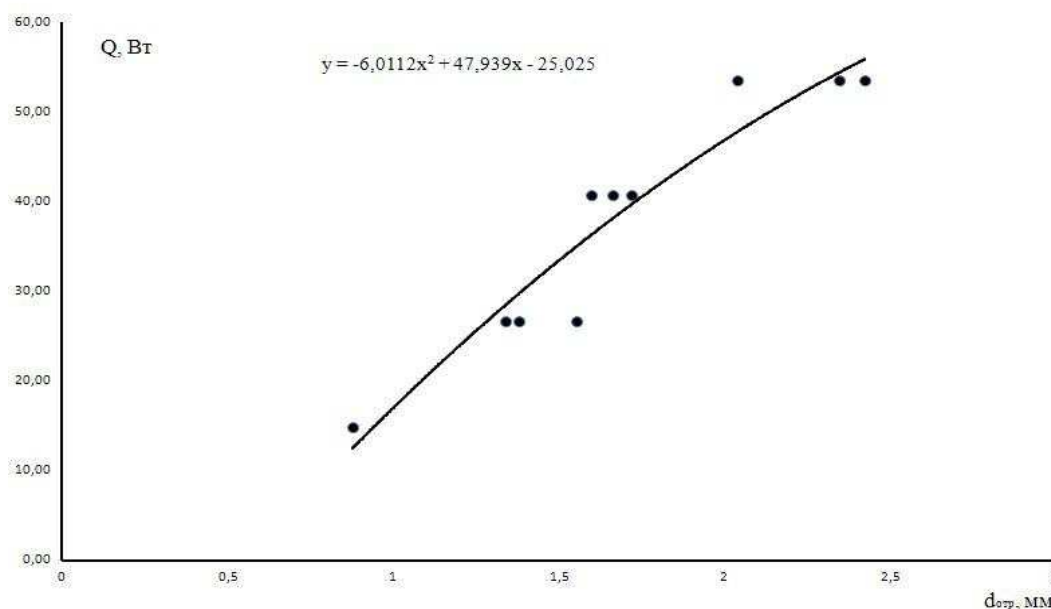


Рис. 3. Графическая зависимость диаметра основания парового пузырька в момент отрыва от плотности теплового потока в данном интервале варьирования температур жидкости

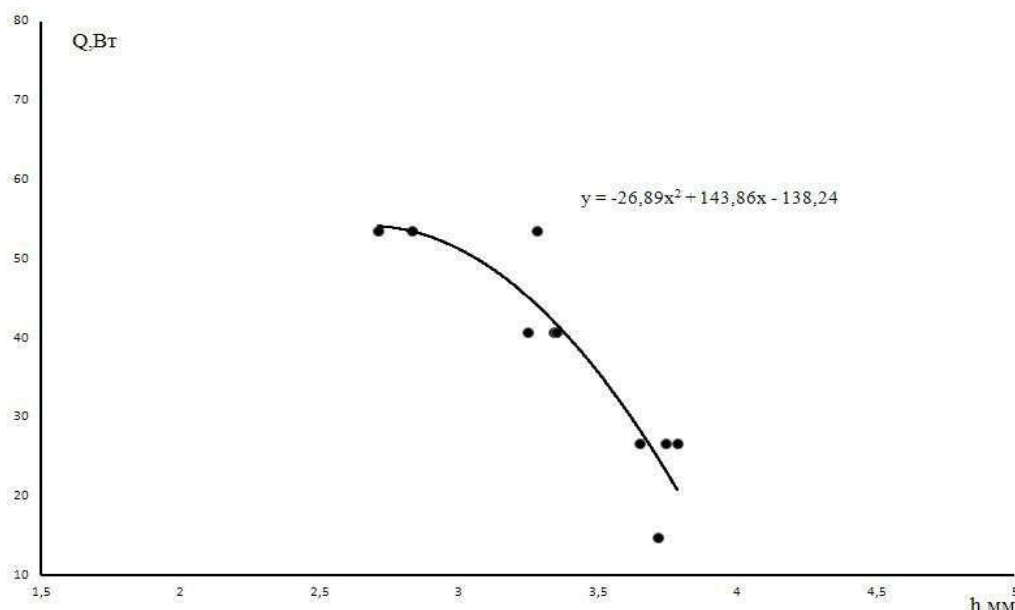


Рис. 4. Графическая зависимость высоты парового пузырька в момент отрыва от плотности теплового потока в данном интервале варьирования температур жидкости

Анализируя полученные данные выявлено, что с увеличением теплового потока диаметр основания парового пузырька в момент отрыва растёт и находится в интервале от 0,8 мм до 2,5 мм. Максимальное значение достигается при температуре насыщения 99,9 °С, и варьируется в диапазоне от 2,1 мм до 2,428 мм. Диаметр основания парового пузырька в момент отрыва характеризует смачиваемость поверхности нагрева. В свою очередь, высота парового пузырька уменьшается с увеличением плотности потока, и интервал варьирования составляет от 2,5 мм до 3,8 мм. Причем максимальное значение достигается при температуре жидкости 85 °С.

Полученные экспериментальные данные дополняют данные [1], где не был зафиксирован отрыв паровых пузырьков от поверхности нагрева. В [1] это было связано с существенным недогревом воды до температуры насыщения, составляющим 45–75 °С.

Автор работы [5] теоретически рассчитал объемы пузырьков перед отрывом в статических условиях для разных значений краевых углов. Он понимал под отрывным диаметром  $d_0$  эквивалентный диаметр  $\sqrt[3]{6V_0/\pi}$ , где  $V_0$  – объем деформированного пузырька перед отрывом, его формула имеет вид:

$$d_0 = 0,0208\Theta \sqrt{\frac{\sigma}{g(p_{\text{ж}} - p_{\text{п}})}}, \quad (1)$$

где  $\Theta$  – краевой угол (измеряется в угловых градусах);  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $p_{\text{ж}}$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $p_{\text{п}}$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>.

Как следует из (1), величина отрывного диаметра при кипении зависит от краевого угла смачивания  $\Theta$ . С увеличением краевого угла смачиваемость поверхности жидкости ухудшается, паровой пузырек при отрыве имеет большие размеры [5]. Данный вывод был сделан если температура  $T_{\text{ж}}$  будет превышать температуру насыщения  $T_{\text{н}}$  на некоторую величину  $\Delta T = T_{\text{ж}} - T_{\text{н}}$ . Анализируя теоретические и экспериментальные данные можно утверждать, что и в случае если температура  $T_{\text{ж}}$  меньше температуры насыщения  $T_{\text{н}}$  данное утверждение подходит, так как с увеличением плотности теплового потока в данном интервале варьирования смачиваемость поверхности увеличивается, а высота парового пузырька уменьшается.

Список литературы:

1. Зейгарник Ю.А., Платонов Д.Н., Ходаков К.А., Шехтер Ю.Л. Визуализация кипения недогретой воды // Теплофизика высоких температур. – 2011. – Т. 49. – №4. – С. 584–588.
2. Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Шехтер Ю.Л. Поведение воздушных пузырей при кипении воды, не догретой до температуры насыщения // Теплофизика высоких температур. – 2011. – Т. 50. – №3. – С 436–441.
3. Ягов В.В., Пузин В.А. Кризис кипения в условиях вынужденного движения недогретой жидкости // Теплоэнергетика. – 1985. – №10. – С. 52.
4. Трещёв Г.Г. Экспериментальное исследование механизма процесса поверхностного кипения. // Сб.: Теплообмен при высоких тепловых нагрузках и других специальных условиях. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – С 51.
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статическая физика. – М.: Наука, 1964. – 568 с.

УДК 536.22:62-784.431

**ВЛИЯНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ПАРА И  
УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ИСПАРЕНИЯ – КОНДЕНСАЦИИ  
ОРОШАЮЩЕЙ ЖИДКОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ  
НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ  
ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ГАЗОВ**

Хромова Е.М., к.ф.-м.н., Опарина И.П.

Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск

E-mail: helenka24@rambler.ru

В ряде технологических процессов требуется охлаждение газов с помощью их орошения водой до определенной температуры. В отсутствие математических моделей контактного теплообмена между газом и каплями жидкости, распыляемой форсунками, такой процесс рассчитать невозможно. На кафедре ОиВ ТГАСУ такая модель разработана и верифицирована, но для умеренных температур воздуха, при которых