

УДК 536.246

## **Экспериментальное изучение влияния взаимодействия пузырьков на их характеристики при нестационарном кипении в потоке недогретой жидкости\***

**П.В. Хан<sup>1,2</sup>, А.А. Левин<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Новосибирский государственный университет*

<sup>2</sup>*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск*

E-mail: polinakhan@gmail.com

В статье представлены результаты экспериментального исследования нестационарного пузырькового кипения на поверхности нагревателя с быстро растущей температурой поверхности. Анализ результатов высокоскоростной видеосъемки с частотой 180000 кадров в секунду и пространственным разрешением 5,5 мкм на пиксель показал, что входные данные для существующих моделей теплоотдачи при пузырьковом кипении подлежат уточнению с учетом существования кластерных и пульсирующих пузырьков. Установлено, что пузырьки, взаимодействуя путем обмена импульсом, теплом и массой пара, ускоряют активацию соседних центров парообразования, поэтому кластеры пузырьков могут формироваться на начальной стадии покрытия паром поверхности нагревателя. Исследованы основные характеристики изолированных, кластерных и пульсирующих пузырьков при перегреве стенки от 0 до 14 К выше температуры начала нуклеации и недогреве потока от 23 до 103 К.

**Ключевые слова:** пузырьковое кипение в потоке недогретой жидкости, нестационарное тепловыделение, кластеры пузырьков, пульсирующие пузырьки.

### **Введение**

Использование низкой начальной температуры жидкости играет существенную роль в повышении эффективности переноса теплоты. Однако глубокий уровень недогрева жидкости заставляет обращаться к нерешенной до сих пор в теоретическом плане задаче описания динамического процесса зарождения паровой фазы и устойчивости образующихся паровых объектов. Особенную проблему представляют задачи с нестационарным выделением теплоты [1], так как быстро изменяющаяся температура поверхности существенно ограничивает использование большинства имеющихся теоретических результатов. Авторы исследования [2] представили обобщенную модель тепловых потоков при пузырьковом кипении для различных вариантов эволюции пузырьков. В этой модели взаимодействие пузырьков было представлено путем учета механизма подавления новых нуклеаций в зоне влияния существующего пузырька за счет снижения локального уровня перегрева поверхности, а также слияния пузырьков при их касании.

---

\* Работа выполнена в рамках гранта РНФ (код проекта 22-19-00092), <https://rscf.ru/project/22-19-00092>.

В работе [3] были уточнены размеры областей влияния пузырьков на теплообмен, при этом отмечалась существенная неравномерность распределения пузырьков на поверхности и, как следствие, необходимость объединения перекрывающихся областей влияния пузырьков вместо их прямого суммирования. Авторы [4] со ссылкой на ряд предшественников и результаты собственных экспериментов показали, что при определенных условиях пузырьки могут подавлять или, наоборот, активировать соседние центры нуклеации. Новейшее экспериментальное исследование [5] показало, что вновь появившийся пузырек может существенно сократить время роста ранее существовавшего пузырька за счет гидродинамического воздействия на его микрослой, осуществляемого без прямого контакта. Настоящее исследование посвящено получению экспериментальных данных о свойствах пузырьков с учетом их взаимодействия в широком диапазоне перегрева стенки и недогрева потока.

### Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на вертикальном прозрачном рабочем участке [6], имеющем в сечении форму квадрата со стороной 18 мм, по центру которого располагался нагреватель в виде полого цилиндра с толщиной стенок 1 мм и внешним диаметром 12 мм. Помимо рабочего участка, экспериментальная установка включала в себя предварительный нагреватель, бак-дегазатор, насос и систему автоматизированного управления условиями эксперимента. Средняя шероховатость  $R_a$  составляла 0,9 мкм, а максимальная — 9 мкм. Средняя скорость потока жидкости составляла 0,52 м/с. Через стальной нагреватель пропусклся прямоугольный импульс 180 мс с силой тока, обеспечивающей скорость роста температуры поверхности нагревателя 3000–3500 К/с. На внутренней стороне цилиндрического нагревателя в стенку было заделано несколько термопар, что позволило измерить максимальное значение температуры нагревателя и скорость роста температуры. До начала эксперимента вода в контуре подвергалась кипячению в течение нескольких часов для освобождения от растворенных в ней газов. Давление на рабочем участке составляло 0,3 МПа, что соответствует температуре насыщения 133 °С. Измерения проводились с недогревом входящего потока  $\Delta T_{\text{sub}} = 23$  и 103 К. Погрешности измерения диаметров пузырьков, температуры, давления и скорости потока составили соответственно  $\pm 5,5$  мкм,  $\pm 0,5$  К,  $\pm 3$  кПа и  $\pm 0,01$  м/с. Видеосъемка проводилась через прозрачную стенку канала, расположенную напротив поверхности нагревателя, с частотой 180257 кадров в секунду, с длительностью экспозиции 5 мкс и пространственным разрешением 5,5 мкм на пиксель при размере кадра 256×256 пикселей.

### Взаимодействие пузырьков

В проведенных экспериментах температура поверхности нагревателя ( $T_w$ ) с течением времени росла, так как выделяющаяся при пропускании электрического тока энергия намного превосходила возможность отведения теплоты. При достижении температурой поверхности температуры начала нуклеации  $T_{\text{ONB}}$ , большей, чем температура насыщения, появлялись пузырьки пара на поверхности нагревателя. По мере дальнейшего роста температуры число активирующихся центров парообразования на единицу площади ( $N_a$ ) и площадь поверхности, занятой паром ( $F_v$ ), росли. В случае близкого расположения пузырей они образовывали кластеры, внутри которых наблюдалось механическое, тепловое и массообменное взаимодействие. Как показали наблюдения, кластеры появляются даже при заполнении паром всего 2 % поверхности нагревателя, поскольку вслед за появлением одного пузырька рядом появляется еще несколько из-за локального

повышения температуры пристенного слоя либо увеличения локальной скорости движения жидкости. Кроме того, при отрыве пузыря на поверхности нагревателя могут оставаться фрагменты пара субмикронных размеров, которые служат центрами парообразования. В полученных авторами результатах эффект ускорения активации соседних центров парообразования преобладает над описанным в работе [2] эффектом подавления соседних центров нуклеации. Основные отличия условий рассматриваемых экспериментов от условий проведения исследования [2] заключаются в толщине стенки и материале нагревателя, высокой скорости роста температуры нагревателя и глубоком недогреве жидкости. В работе [2] в качестве нагревателя использовался слой оксидов индия и олова толщиной менее 1 мкм, нанесенный поверх подложки из сапфира толщиной 1 мм, а измеренные диаметры пузырьков составляли от 0,07 до 0,5 мм. Можно предположить, что подавление соседних центров нуклеации, описанное в [2], наиболее характерно для тонкостенных нагревателей, температура которых подвержена существенным колебаниям в окрестности центров нуклеации под воздействием относительно крупных пузырьков. Следует отметить, что авторы более ранней работы [4] указывали на зависимость характера влияния присутствия пузырька: на подавление либо интенсификацию соседних центров парообразования в зависимости от расстояний между центрами. В настоящем исследовании также наблюдается увеличение плотности центров нуклеации в окрестности существующих на поверхности пузырьков, в результате чего возникают характерные паровые структуры — кластеры пузырьков.

Измеренные скорости роста пузырьков достигали 10 м/с, поэтому очевидно, что скорость движения выталкиваемой жидкости от места нуклеации может легко превысить скорость вынужденного движения жидкости. При росте крупного пузырька соседние мелкие смещаются в направлении от него, а при конденсации — к нему. В обоих случаях происходит их отрыв и конденсация. Так проявляется механическое взаимодействие пузырьков. Взаимодействие путем передачи теплоты и массы пара обычно имеет место при непосредственном контакте пузырьков в направлении более активно растущего на данный момент контакта, который связан, как правило, с пузырем, появившимся позднее. При этом время жизни старого пузыря сокращается, а новый достигает более крупного размера. При больших значениях недогрева потока на начальном этапе пузырькового кипения толщина перегретого слоя жидкости мала, вследствие чего малы и максимальные размеры пузырей. Поэтому при больших недогревах жидкости взаимодействие пузырей является менее интенсивным, а передача теплоты между ними происходит без объединения пузырей и передачи массы — через тонкую прослойку жидкости. При малом недогреве или на более поздних этапах пузырькового кипения, когда температура пристенного слоя жидкости растет, соприкосновение пузырьков чаще всего приводит к их слиянию. При построении моделей теплоотдачи следует учитывать такие пузырьки отдельно от изолированных, поскольку не весь объем нового пузырька получен путем испарения жидкости и отвода теплоты от нагревателя. Пример формирования кластера с передачей пара показан на рис. 1 для недогрева потока 83 К и перегрева стенки относительно  $T_{\text{ONB}}$  9 К.

Случайный характер шероховатости на технической поверхности, а также влияние пузырьков как на соседние, так и на появляющиеся позднее, приводят к исключительному разнообразию в их эволюции и предельных размерах. Для изолированных пузырьков дальнейшее повышение температуры стенки относительно температуры насыщения вызывает активацию центров нуклеации с определенными значениями критического радиуса [7], а максимальный диаметр пузырька по завершении тепловой стадии роста

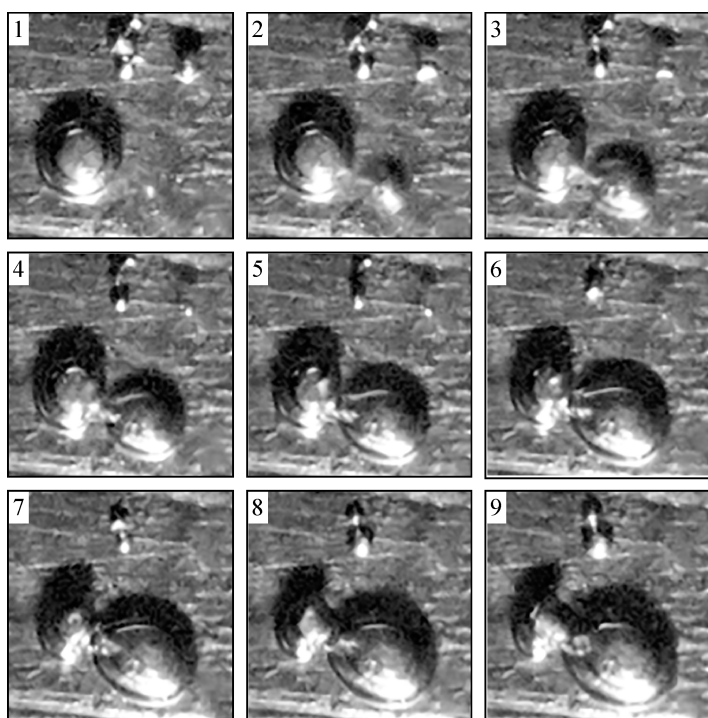


Рис. 1. Картина формирования кластера.

Размер кадра —  $0,54 \times 0,54$  мм; шаг по времени — 5,54 мкс.

коррелирует с толщиной перегретого слоя, которая в случае нестационарного тепловыделения растет со временем [8]. Однако для нестационарного нагрева со значительным недогревом потока также характерен рост пузырьков на инерционной фазе с достижением размеров, значительно превышающих толщину перегретого слоя [9]. В этом случае размер пузырька определяется главным образом степенью локального перегрева жидкости в метастабильном состоянии. В процессе развития кипения на неровностях поверхности, однажды затронутых паровой фазой, остаются паровые зародыши, значительно облегчающие формирование новых пузырей. В результате вторично образующихся пузырьков становится больше, но их размеры, достигаемые на инерционной фазе, уменьшаются. При этом возможно увеличение максимального размера пузырька за счет слияния кластерных пузырьков.

В настоящем исследовании обнаружены центры нуклеации, на которых паровые пузырьки после своего образования циклически претерпевают стадии роста и конденсации без полного исчезновения. Такие пузырьки, называемые далее пульсирующими, по сравнению с изолированными и кластерными пузырьками того же размера, передают от нагревателя в жидкость существенно меньшее количество энергии. Таким образом, помимо классических изолированных пузырьков выявлено присутствие пузырьков двух других типов: кластерных и пульсирующих. Игнорирование их особенностей может привести к значительным погрешностям в предсказании объема паровой фазы и оценки влияния пузырьков на теплообмен. С одной стороны, использование корреляций для плотности центров нуклеации или доли площади, занятой паром, полученных исключительно для изолированных пузырьков, может дать заниженные оценки этих величин, так как кластерные пузырьки благодаря взаимной активации быстрее заполняют поверхность

нагревателя, а у пульсирующих пузырьков отсутствует время покоя между отрывом и конденсацией старого пузырька и появлением нового в том же центре. С другой стороны, если предсказание количества и размеров пузырьков будет корректным, но особенности их тепломассообмена учитываться не будут (повторное использование теплоты, однажды отнятой у нагревателя), величина вклада пузырьков в теплоотдачу будет завышена.

### Обобщение результатов

Анализ и обобщение результатов проводились отдельно для изолированных (single, S), кластерных (cluster, C) и пульсирующих пузырьков (pulse, P), а также для всех пузырьков вместе (All). Поскольку вклад пузырька в теплообмен за счет фазового перехода пропорционален его объему, при обобщении результатов экспериментов будем использовать средневзвешенное по объему значение максимального диаметра пузырьков [6]:

$$D_{\text{vol}} = \left( \sum D_{m,i}^4 \right) / \left( \sum D_{m,i}^3 \right), \quad (1)$$

где суммирование ведется по всем пузырькам, появившимся на заданном интервале времени (0,3 мс), а  $D_{m,i}$  — максимальный диаметр  $i$ -го пузырька. Полученные с шагом 0,055 мс значения  $D_{\text{vol}}$  были обобщены для различных групп пузырьков в виде следующих корреляций:

$$\begin{aligned} D_{\text{vol,S}} &= \left[ (0,000104 \Delta T_{\text{sub}} + 1,44) \cdot (T_w - T_{\text{ONB}}) - 0,0328 \Delta T_{\text{sub}} + 4,67 \right] \cdot 10^{-5}, \\ D_{\text{vol,C}} &= \left[ (-0,0165 \Delta T_{\text{sub}} + 2,25) \cdot (T_w - T_{\text{ONB}}) + 0,163 \Delta T_{\text{sub}} - 1,32 \right] \cdot 10^{-5}, \\ D_{\text{vol,P}} &= \left[ (-0,00981 \Delta T_{\text{sub}} + 0,739) \cdot (T_w - T_{\text{ONB}}) - 0,0329 \Delta T_{\text{sub}} + 6,20 \right] \cdot 10^{-5}, \\ D_{\text{vol,All}} &= \left[ (-0,00741 \Delta T_{\text{sub}} + 1,42) \cdot (T_w - T_{\text{ONB}}) + 0,0709 \Delta T_{\text{sub}} + 6,27 \right] \cdot 10^{-5}. \end{aligned} \quad (2)$$

В полученных обобщениях все коэффициенты размерные, разницы температур выражены в К, а результат — в метрах. Из полученных корреляций следует, что  $D_{\text{vol}}$  растет с ростом недогрева  $\Delta T_{\text{sub}}$  для кластерных пузырьков и уменьшается для изолированных и пульсирующих. При этом коэффициент при  $(T_w - T_{\text{ONB}})$  растет с ростом  $\Delta T_{\text{sub}}$  для изолированных пузырьков и уменьшается для кластерных и пульсирующих. Значения  $D_{\text{vol}}$ , рассчитанные по корреляциям (2), показаны на рис. 2 для пузырьков всех типов в сравнении с измеренными значениями максимальных диаметров  $D_m$  для отдельных пузырьков. Сплошные красные линии и красные квадраты относятся к недогреву 23 К, а синие пунктирные линии и синие треугольники — к недогреву 103 К. Видно, что кластерные пузырьки имеют наибольший размер, а пульсирующие — наименьший.

При сравнении доли пузырьков различных типов по числу активных центров нуклеации  $N_a$  в среднем за период прогрева стенки от  $T_{\text{ONB}}$  до  $T_{\text{ONB}} + 14$  К (рис. 3а, 3б) можно отметить, что при малых значениях недогрева (рис. 3а) преобладают пульсирующие пузырьки, а при больших (рис. 3б) — изолированные. Сопоставление тех же экспериментальных данных по доле поверхности  $F_v$ , занятой пузырьками указанного типа (рис. 3с, 3д), также показывает уменьшение доли пульсирующих пузырьков и увеличение доли изолированных с ростом недогрева потока. Однако при любом недогреве потока наибольшую площадь занимают кластерные пузырьки, как самые крупные.

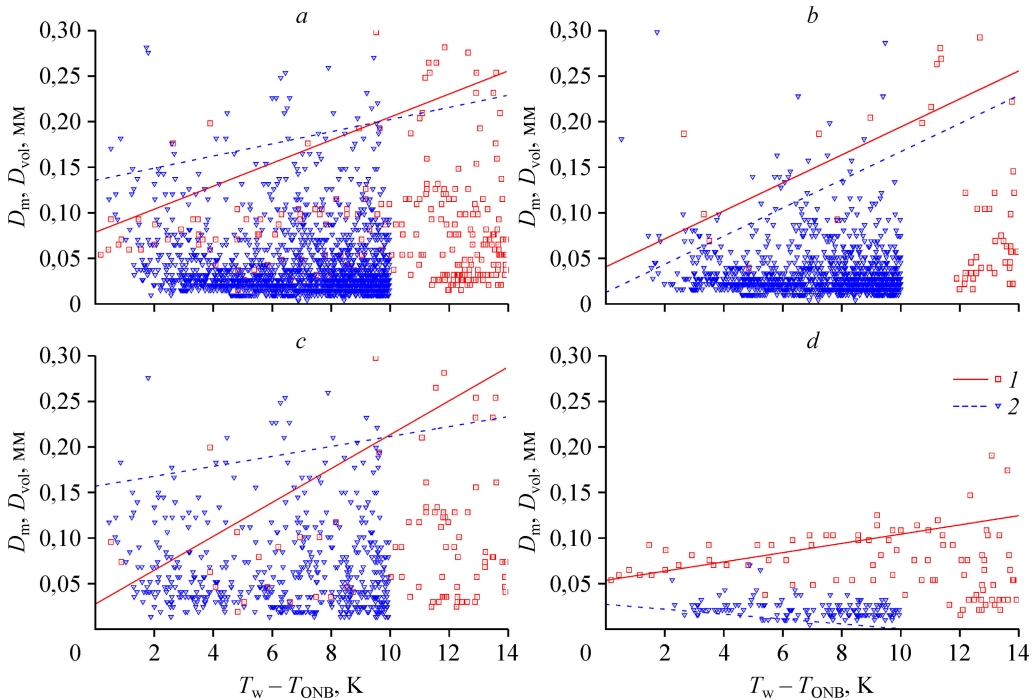


Рис. 2. Зависимость измеренного максимального диаметра пузырьков  $D_m$  (маркеры) и рассчитанного по формулам (2) средневзвешенного по объему диаметра  $D_{vol}$  (линии) от перегрева стенки относительно  $T_{ONB}$  при различных значениях недогрева потока  $\Delta T_{sub}$ .

Приведенные на рисунках значения коэффициента детерминации  $R^2$  относятся к рассчитанным по (1) массивам значений  $D_{vol}$  для пузырьков данного типа в сопоставлении с моделью (2) при всех значениях недогрева; типы пузырьков:  $a$  — все,  $R^2 = 0,47$ ;  $b$  — изолированные,  $R^2 = 0,35$ ;  $c$  — кластерные,  $R^2 = 0,34$ ;  $d$  — пульсирующие,  $R^2 = 0,79$ ;  $\Delta T_{sub} = 23,1$  (1), 103 (2) К.

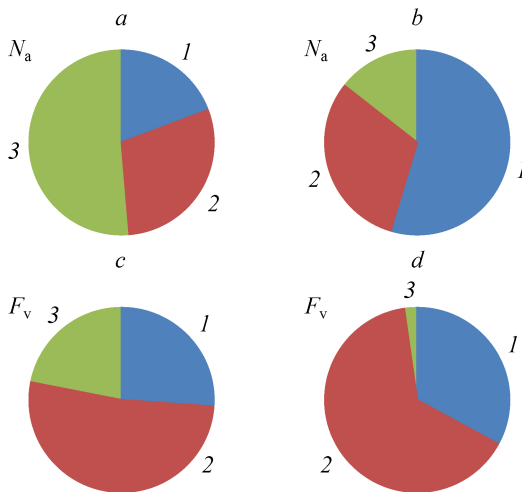


Рис. 3. Доля пузырьков каждого типа, определенная по числу центров нуклеации ( $a, b$ ) и по занимаемой площади ( $c, d$ ), для недогрева 23 К ( $a, c$ ) и 103 К ( $b, d$ ) за время достижения перегрева 14 К над  $T_{ONB}$ .

Типы пузырьков: 1 — изолированные, 2 — кластерные, 3 — пульсирующие.

### Заключение

В результате экспериментального исследования нестационарного кипения недогретого потока жидкости выявлено наличие пузырьков трех типов: изолированных, кластерных и пульсирующих. Опыты проводились при перегреве поверхности нагревателя от 0 до 14 К выше температуры начала нуклеации и недогреве потока от 23 до 103 К. Приведены описания различных механизмов взаимодействия пузырьков в кластерах и их влияния на теплообмен с поверхностью нагревателя. Показаны отличия в условиях теплообмена изолированных и пульсирующих пузырьков. Установлено, что

пульсирующие пузырьки имеют в среднем наименьшие размеры, в то время как кластерные пузырьки оказались самыми крупными во всем диапазоне условий. Анализируя влияние недогрева жидкости на плотность центров нуклеации различного типа, можно сделать вывод, что при малом недогреве потока преобладают пульсирующие пузырьки, а при большом недогреве потока — изолированные. В то же время площадь поверхности, покрытая кластерными пузырьками, больше соответствующих площадей изолированных и пульсирующих пузырьков, так как размеры пузырьков в кластере заметно больше. В целом можно заключить, что кластерные и пульсирующие пузырьки составляют существенную долю от общего числа пузырьков и их характеристики значительно отличаются от изолированных. Поэтому различия в типах регистрируемых в экспериментах пузырьков необходимо учитывать при получении замыкающих соотношений для моделей теплообмена при пузырьковом кипении.

### Список литературы

1. Актершев С.П., Левин А.А., Мезенцев И.В., Мезенцева Н.Н. Автоколебательный режим вскипания сильно недогретой жидкости в проточном кольцевом канале // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 6. С. 909–921.
2. Gilman L., Baglietto E. A self-consistent, physics-based boiling heat transfer modeling framework for use in computational fluid dynamics // Intern. J. Multiphase Flow. 2017. Vol. 95. P. 35–53.
3. Amidu M.A., Jung S., Kim H. Direct experimental measurement for partitioning of wall heat flux during subcooled flow boiling: effect of bubble areas of influence factor // Intern. J. Heat Mass Transf. 2018. Vol. 127. P. 515–533.
4. Judd R.L., Chopra A. Interaction of the nucleation processes occurring at adjacent nucleation sites // J. Heat Transfer. 1993. Vol. 115, No. 4. P. 955–962.
5. Vadlamudi S.R.G., Moiz M., Srivastava A. Microlayer dynamics of hydrodynamically interacting vapour bubbles in flow boiling // J. Fluid Mech. 2023. Vol. 958 (A44). P. 1–22.
6. Levin A.A., Khan P.V. Experimental observation of the maximum bubble diameter in non-stationary temperature field of subcooled boiling water flow // Intern. J. Heat Mass Transf. 2018. Vol. 124. P. 876–883.
7. Hsu Y.Y. On the size range of active nucleation cavities on a heating surface // J. Heat Transfer. 1962. Vol. 84, No. 3. P. 207–213.
8. Hoang N.H., Song Ch.-H., Chu I.-Ch., Euh D.-J. A bubble dynamics-based model for wall heat flux partitioning during nucleate flow boiling // Intern. J. Heat Mass Transf. 2017. Vol. 112. P. 454–464.
9. Su G.Y., Bucci M., McKrell Th., Buongiorno J. Transient boiling of water under exponentially escalating heat inputs. Part II: Flow boiling // Intern. J. Heat Mass Transf. 2016. Vol. 96. P. 685–698.

*Статья поступила в редакцию 7 августа 2023 г.,  
после доработки — 24 октября 2023 г.,  
принята к публикации 21 ноября 2023 г.*