

УДК 532.529

Опытные данные по механизму кипения недогретой воды: скоростная съемка*

Ю.А. Зейгарник, К.А. Ходаков, Ю.Л. Шехтер

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

E-mail: hodakov@ihed.ras.ru

На основании результатов высокоскоростной киносъемки приведены статистические данные по характеристикам процесса кипения недогретой жидкости и поведения паровых и воздушных пузырьков. Описан ряд новых явлений, сопровождающих кипение недогретой воды.

Ключевые слова: недогретая жидкость, кипение, пузыри, время жизни пузыря, распределение пузырей по размерам, деаэрация воды, эмиссия воздушных пузырей, схлопывание пузырей, кризис кипения.

Введение

Интерес к теплообмену при кипении недогретой жидкости продолжает сохраняться уже более полустолетия. Это неудивительно, поскольку этот процесс обеспечивает отвод максимальных тепловых потоков. Он реализуется в системах охлаждения двигателей разного типа и назначения, импульсных магнитогидродинамических установках, используется для отвода тепла в устройствах силовой электроники, от пучковых мишеней и во многих других экстремальных случаях. Рассматривается вопрос о применении этой технологии для охлаждения суперкомпьютеров.

При больших недогревах до температуры насыщения и высоких скоростях охладителя кипение недогретой воды обеспечивает отвод многих десятков МВт/м², рекордная цифра превышает 200 МВт/м². По сути дела, во многих случаях лимитирующим для системы охлаждения в целом уже оказывается не возможность отвода тепла от теплоотдающей стенки к охладителю, а перепад температур в теле конструкции и возможность сохранения на допустимом уровне рабочей температуры охлаждаемого элемента, работа которого сопровождается интенсивным выделением тепла.

В ОИВТ РАН в разное время и в разном ключе обращались к этой проблеме. В 1980-е годы акцент делался на определении предельных возможностей системы охлаждения (критических тепловых потоков и особенно ее гидравлическом сопротивлении) [1]. Одновременно полученный экспериментальный материал позволил сделать логично вытекающий из опытных данных вывод о весьма высокой вероятности протекания процесса теплоотдачи при кипении недогретой жидкости по схеме испарения жидкости из микрослоя в корне и его конденсации в куполе пузыря (функционирование пузыря

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 11-08-00866-а).

в режиме микротепловой трубы), сформулированной еще в 1970-е годы [2]. В последние годы основное внимание в наших исследованиях уделялось выявлению отдельных деталей механизма процесса кипения недогретой жидкости.

1. Экспериментальная установка

Детальное описание экспериментальной установки приведено в работе [3]. Особое внимание уделялось степени деаэрации воды, о чем более подробно будет сказано ниже. Эксперименты проводились при вынужденном течении дистиллированной воды со скоростью до 0,65 м/с в прямоугольном канале шириной 20 мм, высотой 5 мм и длиной 70 мм. Использовались два варианта канала. В первом варианте напротив диагностического окна устанавливалась легкоъемная вставка из стеклотекстолита, на которой монтировалась обогреваемая фольга из нержавеющей стали толщиной $\delta = 0,1$ мм или никрома ($\delta = 0,2$ мм) в виде полоски шириной 3 мм и длиной 30 мм. Обогрев фольги осуществлялся пропусканием выпрямленного электрического тока. Во втором варианте напротив диагностического окна клеивалась фольга в виде круга диаметром 18 мм. В этом случае обогрев осуществлялся лазерным излучением с длиной волны 1,06 мкм. При этом площадь пятна нагрева варьировалась от 1 до 5 мм² и появлялась возможность более детально рассмотреть поведение отдельных пузырьков, в том числе одиночных. Температура тыльной стороны греющей поверхности (со стороны падающего излучения) измерялась тепловизором Hotfind DX. Рабочий участок имел окна для фотографирования и киносъемки процесса кипения как по нормали к поверхности нагрева, так и сбоку под небольшим (0–5 градусов) углом к ней. Использовались как обычные, так и высокоскоростные видеокамеры.

2. Характеристики и поведение паровых пузырьков

Результаты первого этапа исследований характеристик пузырьков представлены в работе [4]. Эксперименты показали, что средняя продолжительность жизни пузырька — несколько сотен микросекунд. Поэтому на втором этапе экспериментов скорость съемки была увеличена до 100 кГц, что позволило уточнить ряд деталей процесса.

На рис. 1 представлены четыре кадра съемки кипения при температуре потока воды 24 °C ($\Delta T_n = T_s - T_{ж} = 76$ °C, где индексы н — недогрев, s — насыщение, ж — жидкость), мощности тепловыделения 1,6 МВт/м² (первые три кадра) и 6 МВт/м² в условиях электрического нагрева.

Можно выделить четыре характерные формы пузырей. А — пузырек классической круглой формы размером чаще всего 150–350 мкм со временем жизни до нескольких сотен микросекунд. На первых трех кадрах хорошо видно большое количество более мелких пузырей типа В (три кадра приведены для того, чтобы показать динамику изменения размеров одного из них), которые движутся вдоль поверхности нагрева медленнее потока и меняют свой размер (пульсируют) с частотой ~1–10 кГц. Размеры таких пузырей ~50–150 мкм, время жизни — от ~100 мкс до нескольких миллисекунд. Пульсирующие пузыри в рассматриваемых условиях составляют заведомо большую часть паровых

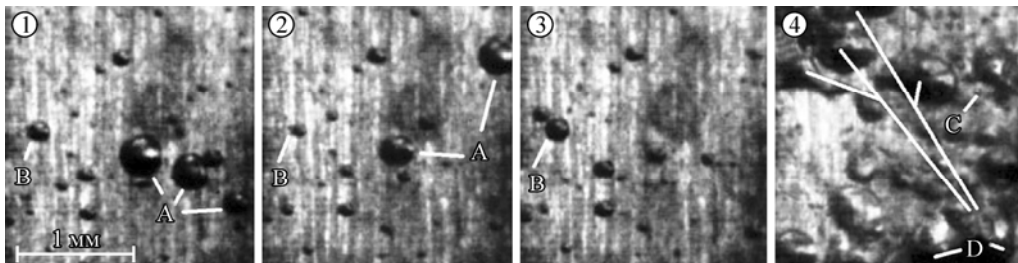


Рис. 1. Кадры съемки кипения на плоской поверхности при электрическом нагреве вертикальной фольги в воде.

пузырей. Этот эффект (пульсации размера пузыря), как «норма» поведения паровых пузырей в недогретой жидкости, отмечается впервые (воздушные пузыри не могут так быстро менять свои размеры). Он несомненно заслуживает дальнейших исследований, так как одновременно с размером пузыря периодически меняется толщина микрослоя жидкости в его основании, интенсивность испарения и баланс потоков испарения и конденсации, то есть базовых «подпроцессов» кипения недогретой жидкости. При больших плотностях теплового потока ($5\text{--}8 \text{ МВт/м}^2$) возрастает частота столкновений с другими пузырями. Пузыри типа С — это мелкие (менее 20 мкм) воздушные пузыри. На первых трех кадрах они не указаны (трудно различимы) и отмечены только на четвертом кадре при режиме большой мощности. Такие пузырьки остаются после схлопывания паровых пузырей типа А и, частично, при эволюции пузырей типа В. Последний тип пузырей — D — является результатом слияния пузырей типа А и В при больших плотностях теплового потока. На их размеры и время жизни (в нашем случае это несколько миллиметров и несколько миллисекунд) начинают влиять характеристики течения. Такие пузыри могут быть устойчивы при сохранении режима теплообмена и течения на некоторой длине канала (они являют собой своего рода аналог снарядного режима течения паровой фазы в трубе).

Для всех типов пузырей характерна бессистемность (хаотичность) их возникновения в разных, как правило, не повторяющихся точках поверхности. Типичные распределения паровых пузырьков по размерам представлены на рис. 2. Видно преобладание пузырьков диаметром $200\text{--}300 \text{ мкм}$. Эти данные получены в результате статистической обработки нескольких сотен фотоснимков случайной выборки.

Увеличение плотности теплового потока q ведет к сдвигу кривых распределения пузырей по размерам вправо, в сторону больших диаметров. К такому же эффекту приводит и снижение недогрева жидкости до температуры насыщения ΔT_n .

Приемлемо близкие распределения с учетом отличия в давлении (более высоком) и недогреве (более низком) были получены в работе [5]. Аналогичными оказались и тенденции в изменении распределения пузырьков по размерам в функции q и ΔT_n . В целом, к такому же итогу относительно преобладающих размеров пузырей и закономерностей их изменения в зависимости от режимных параметров приводит и сопоставление наших данных с результатами экспериментов [6].

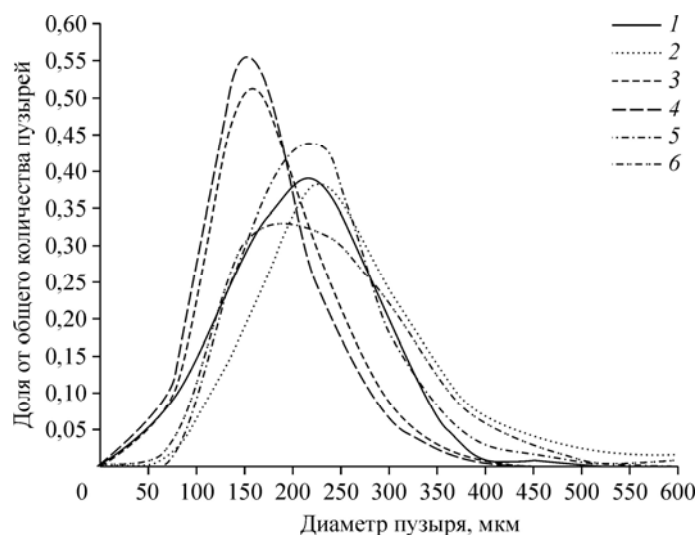


Рис. 2. Распределение пузырей по размерам для поверхностей с разной шероховатостью при электрическом нагреве.

$T_n = 68$ (1, 2), 66 (3, 4), 18 (5, 6) °С, $q = 6,45$ (1, 2), $6,1$ (3, 4), $1,54$ (5, 6) МВт/м^2 для шероховатой (1, 3, 5) и гладкой (2, 4, 6) поверхностей.

Выше уже отмечалось хаотическое пространственное распределение действующих пузырей, то есть, отсутствие постоянно действующих центров парообразования, характерных для кипения жидкости при температуре насыщения. Можно было предположить, что этот факт в какой-то мере связан с малой шероховатостью ($\sim 0,18$ мкм) используемой фольги. Однако, создание с помощью стандартной шлифовальной бумаги на части этой фольги участков с большей на порядок средней шероховатостью ($\sim 1,8$ мкм) не изменило картину процесса — пространственная хаотичность образования пузырей сохранилась, как сохранилось и распределение пузырей по размерам, о чем свидетельствуют данные рис. 2.

Средняя «заселенность» теплоотдающей поверхности паровыми пузырями составляла 20–25 пузырей на см^2 при плотности теплового потока ~ 2 МВт/ м^2 и $\Delta T_{\text{н}} \approx 60$ °С. Пузыри занимают малую долю поверхности нагрева в плане, менее 10 %. Среднее расстояние между паровыми пузырями составляло около 2 мм. Тем самым, каждый действующий паровой пузырь охлаждал площадь примерно 3–4 мм^2 . С учетом средней продолжительности жизни пузыря (см. ниже) это дает $\sim (70-80) \cdot 10^3$ пузырей на 1 см^2 в секунду. То есть, даже при достаточно малых для кипения недогретой воды тепловых потоках в течение 1 с на 1 см^2 греющей поверхности возникают и заканчивают свое существование от 50 до 100 тысяч паровых пузырьков. При этом, транспорт тепла от периферии «обслуживаемой» пузырем зоны к микрослою под действующим пузырем требует определенных температурных напоров, тем больших, чем тоньше теплоотдающая фольга и чем ниже ее теплопроводность. Тем самым, после схлопывания действующего парового пузыря возрастает вероятность возникновения следующего пузыря на новом, более горячем месте на периферии обслуживаемой зоны.

Проведение съемок высокоскоростной кинокамерой позволило также уточнить время жизни пузыря — в среднем оно составляло 200–700 мкс и лишь при приближении к кризису кипения возникали крупные агломераты, длительность жизни которых составляла уже единицы миллисекунд. В целом, данные по продолжительности жизни парового пузыря согласуются с результатами работ [5, 6]. Продолжительность стадии роста пузыря составляла 50–100 мкс. Длительность стадии схлопывания больше, она может доходить до 200 и более микросекунд.

Высокоскоростная съемка скорректировала представления о «статичности» паровых пузырей, которые были изложены в работе [4]. Оказалось, что центр пузыря смещается вдоль греющей поверхности со скоростью, близкой к скорости сносящего потока, даже при сравнительно невысоких значениях последнего, как это происходило в представляемых экспериментах ($\sim 0,4$ м/с). Поскольку размер смещения значительно меньше размеров пузыря утверждать о наличии смещения контактного (сухого) пятна в корне парового пузыря невозможно.

С помощью высокоскоростной съемки были уточнены важные детали стадии схлопывания пузыря. На рис. 3 показаны кадры съемки при $q = 1,6$ МВт/ м^2 , $T_{\text{ж}} = 35$ °С, расходе $G = 0,064$ кг/с. Пузырь выбирался достаточно большого размера, чтобы были

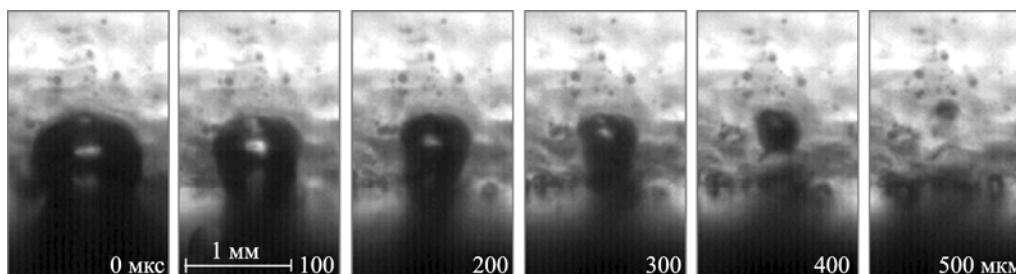


Рис. 3. Заключительные кадры жизни парового пузыря в недогретой воде (вид сбоку).

$$q = 1,6 \text{ МВт/м}^2, T_{\text{ж}} = 35 \text{ °С}, G = 0,064 \text{ кг/с.}$$

различимы детали процесса. Отсчет велся от кадра с максимальным диаметром с шагом 100 мкс (через 5 кадров). Видно, что максимальная скорость процесса схлопывания наблюдается в нижней части пузыря, у греющей стенки. Остаток пузыря, уже потеряв связь с греющей поверхностью, оставляет воздушный пузырь малого размера.

3. Выделение растворенного воздуха и характеристики кипения недогретой воды

Хорошо известно, что вода содержит растворенный воздух, выделяющийся в процессе кипения жидкости в виде воздушных пузырьков, которые практически не участвуют в процессе теплообмена (во всяком случае, их вклад в этот процесс достаточно мал), но существенным образом влияют на статистические характеристики процесса. Эти пузырьки мелкие, их достаточно много даже при очень интенсивной деаэрации воды и, что самое главное, в отличие от паровых пузырей они не схлопываются при контакте с потоком воды, недогретой до температуры насыщения. Единожды выделившись, пузыри продолжают существовать все время наблюдения, в том числе за пределами рабочего участка, и даже долгое время по окончании эксперимента. Особо подчеркнем, что путем термической деаэрации полностью удалить воздух нельзя.

Возможное количество растворенного воздуха при разных способах термической деаэрации оценено в [7]. Рисунок 4, воспроизводимый из этой работы, не только показывает сильное влияние способа термической деаэрации, но и демонстрирует недостижимость полного исключения появления воздушных пузырьков. В частности, после схлопывания каждого парового пузырька при деаэрации длительным кипячением оставалось несколько мелких воздушных пузырьков, которые уходили в объем жидкости и при необходимости могли быть собраны в специальную ловушку. Значительная часть этих воздушных пузырей оставалась на греющей поверхности и скользила по ней, практически не изменяясь в размерах.

При статистической обработке экспериментального материала, в частности при нахождении распределения паровых пузырьков по размерам, воздушные пузыри следовало исключить из рассмотрения. При анализе киносъемки эти пузыри было несложно идентифицировать по их отличительному характерному признаку — отсутствию конденсации (схлопывания) в течение длительного отрезка времени. Анализ многочисленных киноснимков показал, что воздушные пузыри крайне редко имеют размер более 100 мкм, для них типичны диаметры 20–60 мкм. Напротив, паровые пузыри редко имеют диаметр менее 100 мкм. Поэтому при статистической обработке экспериментального материала все пузыри диаметром менее 100 мкм условно принимались за воздушные, хотя, естественно, такой подход несет в себе известный субъективизм. Этот прием использовался при получении данных к рис. 3 и количественных результатов, представленных в разделе 3.

Заметим, что согласно проведенным экспериментам заселенность поверхности нагрева паровыми пузырьками получается существенно ниже, чем в данных, представленных в работе [6], что связано в первую очередь с исключением из рассмотрения многочисленных воздушных пузырей.



Рис. 4. Влияние степени деаэрации, кипение на капилляре.

Настоящее многостороннее изучение процессов образования и поведения пузырьков воздуха при кипении недогретой воды позволяет с достаточной уверенностью сформулировать тезис о том, что наблюдавшаяся во многих экспериментах эмиссия микропузырьков не есть проявление специфического типа кипения при больших q и $\Delta T_{\text{н}}$, а есть испускание (эмиссия) воздушных пузырьков, образующихся в значительном количестве из воздуха, поступившего в паровые пузыри с испаряющейся водой и сохранившегося после конденсации пара (схлопывания пузыря) [8]. Кипение с эмиссией микропузырьков (microbubble emission boiling — МЕВ) многократно описывалось в работах японских исследователей [9–12] в области перегревов стенки, отвечающих переходному режиму кипения насыщенной воды.

Важно иметь в виду, что выделение с течением времени значительного количества воздуха может составить определенную опасность для разветвленных систем с параллельными каналами и «мертвыми» зонами в плане их эксплуатационной эффективности и надежности, если вода деаэрируется термическим путем. Для надежной работы канальных и особенно микроканальных систем охлаждения необходима отработка и применение химической деаэрации воды и создание охлаждающих контуров с минимальным контактом с воздухом, либо использование охладителя, в котором воздух или инертный газ растворяются крайне слабо.

4. Некоторые вопросы физики кипения недогретой воды

Динамика крупных пузырей

В разделе 3 отмечалось, что наряду с обычными паровыми пузырями размером 200–400 мкм, преобладающими в количественном отношении, на греющей стенке существуют и более крупные агломераты неправильной формы, образующиеся в результате слияния и соединения (примыкания) пузырей разного размера (рис. 5). Число таких пузырей возрастает при увеличении теплового потока и снижении недогрева. Их размер может достигать нескольких миллиметров, а продолжительность жизни — нескольких миллисекунд. Тем не менее, общий характер поведения этих пузырей остается прежним: они зарождаются хаотично в произвольных точках поверхности нагрева и в итоге после различной (также хаотичной) эволюции их размера и формы так же схлопываются. Причем подобная ситуация наблюдается вплоть до тепловых потоков, составляющих 85–90 % от критического.

Чтобы лучше рассмотреть динамику крупных пузырей, был использован следующий прием. С помощью прозрачной вставки высота канала была уменьшена до 2,5 мм, пузырь был сплюснут и зажат между греющей поверхностью и прозрачной вставкой, что позволило осуществить киносъемку процессов, происходящих в слое под большим пузырем. Наблюдавшуюся картину иллюстрирует рис. 6.

Видно существование в жидкой пленке под большим пузырем паровых пузырей размером 200–300 мкм и мелких воздушных пузырей. Схожее явление описано в работе [13]. Поскольку температура пленки под большим пузырем выше температуры

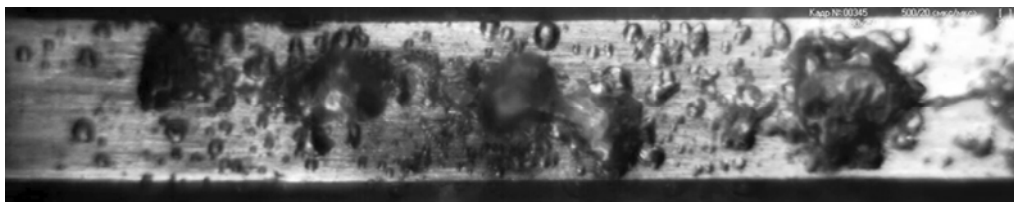


Рис. 5. Крупные агломераты пузырей. $T_{\text{ж}} = 58$ °С, $q = 2,4$ МВт/м².

Рис. 6. Крупные агломераты пузырей.

$q = 3,2 \text{ МВт/м}^2$, фольга из никрома $0,2 \times 3 \times 30 \text{ мм}$, $T_{\text{ж}} = 58 \text{ }^\circ\text{C}$.

насыщения, эти пузыри не схлопываются, а прорывают межфазную поверхность, позволяя содержащемуся в них пару выйти в объем большого пузыря. Заметим, что зарождение пузырей в пленке продолжает носить хаотический характер. Априорно трудно сказать, могут ли эти внутренние пузыри быть источником сухих пятен, ведущих к кризису кипения в недогретой жидкости, как нельзя и исключить подобное развитие событий.

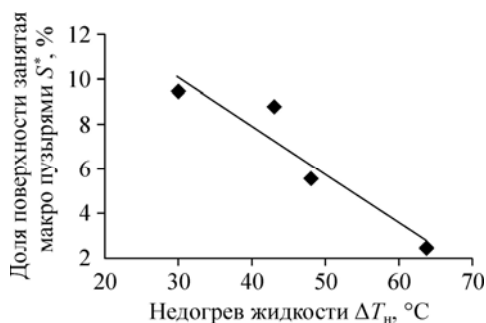
Факторы, стимулирующие кризис кипения

Несмотря на наличие крупных пузырей, площадь греющей поверхности, занимаемая ими перед кризисом, согласно нашим наблюдениям невелика (рис. 7). Рост паросодержания и площади сухих пятен происходит, как всегда при кризисных явлениях, лавинообразно. При этом образование крупных пузырей является предвестником (индикатором) приближающегося кризиса.

В работе [14] отмечалось, что процессы, происходящие в микрослое под паровым пузырем и определяющие температурный режим стенки, и процессы во внешнем потоке, управляющие отводом тепла от паровых пузырей, в известной степени независимые и саморегулирующиеся. Этот тезис перекликается с положениями статьи [15], где также предлагается рассматривать динамику существования и испарения микрослоя жидкости как, в известной степени, автономную систему. Возникающие при приближении к кризису сухие пятна, имеющие повышенную температуру, являются очагами температурных возмущений (неустойчивости) конечной величины, определяемой размерами сухого пятна и его температурой. Можно полагать, что определенного прогресса в описании механизма кризиса кипения недогретой воды можно достигнуть, используя для анализа термической (температурной) устойчивости системы «греющая стенка — испаряющийся микрослой жидкости — паровой пузырь» к конечным температурным возмущениям методы, разработанные С.А. Ковалевым [16].

Влияние размеров теплоотдающей поверхности на характеристики кипения недогретой воды

В работе [1] указывалось, что характеристики кипения недогретой воды в канале (коэффициент теплоотдачи, критическая плотность теплового потока) определяются локальными параметрами потока: недогревом до температуры насыщения, давлением и массовой скоростью охладителя. То есть кипение недогретой воды является своего рода локальным процессом. Это вполне объяснимо, поскольку при недогреве воды до температуры насыщения $\Delta T_{\text{н}} > 30 \text{ }^\circ\text{C}$ в ядре течения отсутствует паровая фаза, и этим кипение недогретой воды отличается от кипения насыщенной или слабо недогретой воды, где паросодержание и режим течения в двухфазном ядре потока меняются вдоль



температуры насыщения $\Delta T_{\text{н}} > 30 \text{ }^\circ\text{C}$ в ядре течения отсутствует паровая фаза, и этим кипение недогретой воды отличается от кипения насыщенной или слабо недогретой воды, где паросодержание и режим течения в двухфазном ядре потока меняются вдоль

Рис. 7. Доля поверхности, занятая макропузырями.

Приведенная плотность мощности теплового потока $q^* = q/q_{\text{кр}} = 0,95$.

канала. Одновременно тепловая обстановка в пристенном слое у корня пузырьков определяется поведением группы соседствующих пузырьков и практически не зависит от обстановки, существующей на расстоянии в несколько диаметров пузырей от рассматриваемой точки.

Описанная картина характерна для протяженных теплоотдающих поверхностей. Для теплоотдающих поверхностей малой площади ситуация оказывается несколько иной: поступление холодной жидкости к функционирующим пузырькам оказывается облегченным, поскольку в непосредственной близости от них находятся и необогреваемая поверхность при одностороннем нагреве и холодный пристенный слой. В ходе настоящих исследований была измерена критическая плотность теплового потока $q_{кр}$ на обогреваемых пластинках размером 7×3 и 5×5 мм (ширина \times длину в направлении течения), обтекаемых водой со скоростью 0,5 м/с при $\Delta T_n = 65$ °С. В первом случае величина $q_{кр}$, определявшаяся по пережогу теплоотдающей поверхности, была $5,5$ МВт/м², а во втором — заметно меньше — $3,5$ МВт/м². На протяженных нагревателях до наступления кризиса кипения при одинаковой плотности теплового потока перегрев стенки $\Delta T_{ст} = T_{ст} - T_s$ на удалении 5 мм от входа в канал был существенно ниже, чем на удалении 15 мм от входа в него.

Симптоматично, что описываемый японскими авторами [9–12] режим кипения недогретой воды с эмиссией микропузырьков (в разделе 3 настоящего исследования и в работе [7] было показано, что эмитируются пузырьки воздуха) также наблюдался на теплоотдающих поверхностях малой площади, порядка 10 мм², или в условиях существования дополнительных интенсифицирующих теплоотдачу воздействий (бомбардировка струями недогретой воды или «взрывающимися» при контакте с горячей поверхностью каплями недогретой воды, отсос образующихся паровых пузырей и т.п.). Облегченное поступление холодной жидкости в пристенный слой ведет к увеличению $q_{кр}$, расширению диапазона $\Delta T_{ст}$ и q , при которых, пусть с худшими коэффициентами теплоотдачи, как это имело место в исследованиях [9–12], продолжает существовать пузырьковое кипение недогретой воды.

Этот вопрос требует дополнительных изучений, поскольку отвод высоких тепловых потоков от малогабаритных и даже миниатюрных стоков тепла становится все более актуальной задачей.

Заключение

1. Выявлено, что при кипении недогретой воды возникновение паровых пузырей на теплоотдающей поверхности носит хаотичный (бессистемный) характер, постоянно действующие центры парообразования отсутствуют. Эта ситуация справедлива и для теплоотдающих поверхностей с искусственной шероховатостью. Размеры пузырьков изменяются в достаточно широких пределах, при этом преобладают пузырьки размером 200–300 мкм. Продолжительность жизни пузыря составляет 200–700 мкс, в среднем — 500 мкс. Продолжительность стадии роста пузыря — 50–100 мкс, стадии схлопывания — 200 мкс и более. При тепловом потоке около 2 МВт/м² заселенность греющей поверхности пузырями составляет $(70–80) \cdot 10^3$ 1/(см²·с). С ростом теплового потока заселенность увеличивается.

2. Процесс схлопывания парового пузыря происходит ассиметрично и реализуется в основном в нижней его части. Завершается процесс конденсацией остатков пара на некотором удалении от греющей поверхности, после чего остается мелкий воздушный пузырек.

3. Кипение недогретой воды сопровождается интенсивным выделением пузырьков растворенного воздуха, размеры которых преимущественно меньше 100 мкм. При статистической обработке результатов кино съемок эти пузыри должны быть исключены из рассмотрения.

4. С возрастанием плотности теплового потока и снижением недогрева увеличивается число паровых агломератов неправильной формы и размером до нескольких миллиметров. Срок жизни агломератов достигает нескольких миллисекунд. Появление агломератов предвещает возникновение кризиса теплоотдачи. В пленке жидкости под паровыми агломератами существуют (возникают и схлопываются) паровые пузыри размером 100–300 мкм, а также мелкие воздушные пузыри.

5. При малых размерах теплоотдающей поверхности предельные плотности теплового потока возрастают. Это обстоятельство может быть использовано при разработке миниатюрных высокотеплонапряженных объектов.

Список литературы

1. Зейгарник Ю.А., Климов А.И., Маслакова И.В. Предельные параметры для систем охлаждения, использующих кипение сильно недогретой воды // Теплоэнергетика. 1985. № 12. С. 55–59.
2. Bergles A.E. Burnout in boiling heat transfer. Part II. Subcooled and low quality forced convection systems // Nuclear Safety. 1977. Vol. 18, No. 2. P. 154–167.
3. Зейгарник Ю.А., Платонов Д.Н., Ходаков К.А., Шехтер Ю.Л. Микропузырьковое кипение: механизм процесса, задачи и методы исследований // Теплофизика высоких температур. 2009. Т. 47, № 5. С. 707–711.
4. 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.
5. Трещёв Г.Г. Экспериментальное исследование механизма процесса поверхностного кипения // Теплообмен при высоких тепловых нагрузках и других специальных условиях. М.-Л., Госэнергоиздат, 1959. С. 51–68.
6. Gunther F.C. Photographic study of surface — boiling heat transfer to water with forced convection // Trans. ASME. Ser. C. J. of Heat Transfer. 1951. Vol. 73, No. 1. P. 115–123.
7. Зейгарник Ю.А., Ходаков К.А., Шехтер Ю.Л. Поведение воздушных пузырей при кипении воды, недогретой до температуры насыщения // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 3. С. 436–441.
8. Зейгарник Ю.А., Платонов Д.Н., Ходаков К.А., Шехтер Ю.Л. О природе эмиссии микропузырей при кипении недогретой воды // Теплофизика высоких температур. 2012. Т. 50, № 1. С. 83–88.
9. Inada S., Yang W.-J. A study of miniaturization boiling phenomena // Proc. 11th IHTC, Kyongju, Korea, 1998. Heat Transfer. 1998. Vol. 2. P. 509–514.
10. Kumagai S., Kawata K., Katagiri T., Shimada R. Temperature and pressure fluctuations associated with bubble motion in microbubble emission boiling // Proc. 11th IHTC Kyongju, Korea, 1998. Heat Transfer. 1998. Vol. 2. P. 279–284.
11. Suzuki K., Tamura S., Kawamura H., Maki H. Subcooled flow boiling with microbubble emission developed for high heat flux cooling technology in power electronics // Proc. 13th IHTC Heat Transfer, 2007, Sydney, Australia, BOI-21.
12. Tange M., Yuasa M., Takagi S., Shoji M. Microbubble emission flow boiling in a microchannel and minichannel. Microchannels and minichannels // Proc. Second Intern. Conf. on Microchannels and Minichannels, Rochester, New York, USA, June 17–19, 2004. P. 589–594.
13. Victor H. Del Valle M., Kenning D.B.R. Subcooled flow boiling at high heat flux // Intern. J. Heat and Mass Transfer. 1985. Vol. 28, No. 10. P. 1907–1920.
14. Gotovskii M.A., Zeigarnik Yu.A. On peculiarities of mechanism of boiling crisis in channel under high subcooling conditions // Proc. 11th IHTC 1998. Kyongju, Korea, 1998. Heat Transfer. 1998. Vol. 2. P. 255–260.
15. Theophanous T.G., Dinh T.N., Tu J.P., Dinh A.T. The boiling crisis phenomenon. Part II. Dryout dynamics and Burnout // Experimental Thermal and Fluid Sci. 2002. Vol. 26. P. 793–810.
16. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А., Соловьев Л.С. Теплообмен в ядерных энергетических установках. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 548 с.

Статья поступила в редакцию 5 июля 2013 г.