

УДК 532.685:536.24

В. А. Майоров, Л. Л. Васильев

## ЗАРОЖДЕНИЕ ГАЗОВЫХ И ПАРОВЫХ ПУЗЫРЬКОВ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЖИДКОСТИ В ПОРИСТЫХ МЕТАЛЛАХ

*Приводятся результаты аналитического и экспериментального исследований условий зарождения газовых и паровых пузырьков при движении жидкости в пористых металлах.*

Один из эффективных методов интенсификации процессов теплообмена — организация течения теплоносителя в пористых материалах, имеющих развитую внутривористую поверхность. При этом используются и однофазный, и испаряющийся потоки жидкости. Важным моментом в этих процессах является зарождение газовых и паровых пузырьков. Так, появление и рост газовых пузырьков приводят к формированию двухфазного течения и увеличению сопротивления потока, а зарождение и рост паровых пузырьков определяют положение начала области испарения в пористых теплообменниках. Ниже приводятся результаты исследования условий зарождения газовых и паровых пузырьков при движении воды в пористых металлах.

Возникновение парового зародыша как в объеме насыщенной жидкости, так и на элементе поверхности твердой фазы носит флуктуационный характер. Вероятность флуктуационного возникновения зародыша пропорциональна  $\exp(-L/kT)$ , где  $L$  — работа образования пузырька. На поверхности раздела жидкость — твердая фаза молекулярное сцепление ослаблено и работа образования пузырька, равная изменению термодинамического потенциала системы  $\Delta\Phi$  при его появлении, меньше, чем в объеме жидкости, и может быть рассчитана, согласно [1], из выражения

$$\Delta\Phi = (f_v - f_l) \rho V + \sigma S \left[ 1 - \frac{S_w}{S} (1 - \cos \theta) \right]. \quad (1)$$

Здесь  $f_v, f_l$  — химические потенциалы паровой и жидкостной фаз;  $\rho$  — плотность пара;  $V, S$  — объем и полная поверхность пузырька;  $S_w$  — поверхность соприкосновения пузырька с твердой фазой;  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения;  $\theta$  — краевой угол смачивания.

Второе слагаемое правой части (1) характеризует работу образования поверхности пузырька, которая зависит от физико-химических ( $\theta$ ) и геометрических ( $S_w/S$ ) свойств поверхности. Выражение (1) определяет два направления активного воздействия на процесс появления зародышей: а) ухудшение локальной смачиваемости (увеличение  $\theta$ ); б) создание условий для увеличения поверхности соприкосновения зарождающегося пузырька с твердой фазой  $S_w/S$ . В частности, в [1] показано, что при ухудшенном локальном смачивании ( $\theta \geq \pi/2$ ) и при наличии микроуглублений самой простой конической формы образования зародышей паровой фазы возможно без перегрева при термодинамическом равновесии.

Выражение (1) выведено и экспериментально качественно подтверждено для условий возникновения паровых пузырьков на поверхности нагрева при кипении, но оно полностью применимо и к зарождению газовых пузырьков в насыщенной газом жидкости. Однако последний процесс характеризуется некоторыми особенностями. Так, зарождение газовых пузырьков более затруднено вследствие низкой концентрации растворенного газа. Состояние равновесной насыщенности жидкости растворенным газом, кроме давления и температуры, определяется до полнительно концентрацией растворенного газа, которая в обычных условиях контролируется достаточно сложно.

Пористые металлы в наибольшей степени удовлетворяют требованиям облегчения условий зарождения пузырьков по геометрической структуре (что очевидно) и в значительной степени — по наличию многочисленных участков ухудшенной смачиваемости. Технология получения пористых металлов обуславливает нарушение микроструктуры металла и появление неоднородностей по химическому составу вблизи контакта частиц и окисных пленок. В [2] показано, что такие факторы вызывают значительное изменение смачиваемости. Если учесть, что для возникновения газового пузырька достаточно иметь участок ухудшенной смачиваемости линейным размером 0,1—1,0 мкм, то все точки контакта частиц в пористом металле можно рассматривать в качестве потенциальных центров зарождения пузырьков.

При образовании газового пузырька в сужающемся микроуглублении с плохо смачиваемыми боковыми поверхностями ( $\theta > \pi/2$ ) давление газа в нем может быть значительно меньше, чем в жидкости. В этом случае газовый пузырек сохранится даже при возможном уменьшении насыщенности жидкости растворенным газом ниже равновесной. При возвращении жидкости в состояние насыщения или пересыщения этот пузырек будет играть роль постоянного центра выделения растворенного газа.

*Методика проведения экспериментов.* Эксперименты по выявлению условий зарождения газовых и паровых пузырьков при течении жидкости в пористых металлах выполнены с использованием дистиллированной воды двух уровней насыщенности растворенным воздухом — насыщенная вода и деаэрированная. Насыщение воздухом при атмосферном давлении и температуре 20 °С достигалось длительным перемешиванием и последующим отстаиванием для удаления воздушных пузырьков. Деаэрация осуществлялась предварительным прогревом воды до температуры 80 °С с последующим охлаждением в закрытом баке под вакуумом.

Обеспечивалось два метода течения воды через образец.

1-й метод. Вода дозирующим насосом из бака подавалась через гидравлический стенд, подогревалась под давлением в теплообменнике термостата перед входом в образец и затем продавливалась через образец при атмосферном давлении на выходе. Температура воды измерялась с помощью установленной внутри образца термопары. Удельный массовый расход воды изменялся в диапазоне 1—10 кг/м<sup>2</sup>·с.

2-й метод. Вода из открытой прозрачной емкости при атмосферном давлении и температуре 20 °С продавливалась через образцы под действием вакуума на выходной поверхности образца.

Пересыщение воды растворенным воздухом при течении через пористый металл в обоих методах происходит за счет понижения давления. Производились визуальное наблюдение и фотосъемка картины истечения воды на выходной поверхности образцов. В первом методе фиксировалась температура воды, при которой наблюдалось появление мельчайших видимых одиночных воздушных пузырьков на выходной поверхности, во втором — определялось давление на выходе образца при появлении одиночных видимых пузырьков в потоке после образца.

Исследуемые образцы в обоих методах имеют форму дисков. Пара-

метры образцов приведены в таблице. Образцы 1—5 использовались только во 2-м методе, образцы 6—8 — в 1-м.

**Результаты экспериментов.** 1-й метод, насыщенная вода. Температура воды, при которой на внешней поверхности образца начинают выделяться видимые мельчайшие воздушные пузырьки, зависит от условий эксперимента. При непрерывном повышении температуры воды от 20 °С видимые пузырьки появляются при температуре 38—45 °С. При дальнейшем повышении температуры число центров выделения, размеры пузырьков и скорость их роста увеличиваются. При удельных массовых расходах воды меньше 5 кг/м<sup>2</sup>·с пузырьки постепенно вырастают до диаметра  $\approx 1$  мм, а затем отрываются и сносятся потоком. Обильное выделение и накопление пузырьков на внешней вертикальной поверхности образца под стекающей по ней жидкостной пленкой при течении по-



Рис. 1. Выделение и накопление воздушных пузырьков на внешней поверхности образца

догретой насыщенной воды отчетливо видно на рис. 1. Диаметр масштабной проволоочки у поверхности равен 0,45 мм. При массовых расходах больше 5 кг/м<sup>2</sup>·с выделяющиеся мельчайшие пузырьки не задерживаются на поверхности, а сразу сносятся потоком.

Если после длительного течения с выделением пузырьков постепенно понижать температуру воды, то прекращение выделения пузырьков наблюдается при значительно меньшей температуре 28—29 °С, одинаковой для всех исследованных образцов. Важно отметить, что теперь при этой температуре видимые пузырьки как прекращают появляться при подходе от более высоких температур, так и начинают появляться при приближении к ней со стороны меньших температур. Равновесное содержание растворенного воздуха в воде при общем атмосферном давлении воздуха и паров воды при повышении температуры от 20 до 28 °С уменьшается незначительно и составляет 0,87 от равновесного содержания в исходном состоянии.

Отмеченное гистерезисное изменение температуры начала появления видимых пузырьков от  $\approx 40$  до 28 °С объясняется тем, что возникновение первых воздушных зародышей внутри пористой структуры происходит при заметном пересыщении. Затем после постепенного образования и накопления многочисленных воздушных пузырьков, условия выделения растворенного воздуха при течении воды сквозь пористый металл приближаются к равновесным. Это и приводит к понижению темпера-

Характеристики исследованных образцов (1—7—бронза, 8—нержавеющая сталь)

№ образца	Фракция исходного порошка, мкм	Пористость	Толщина, мм	Диаметр, мм	Средний размер пор, мкм
1	50—63	0,295	8,70	21	15,5
2	63—100	0,308	8,60	21	23,5
3	100—160	0,285	8,40	21	34,0
4	160—200	0,358	9,07	21	65
5	200—315	0,408	9,90	21	110
6	50—63	0,215	14,8	28	10,2
7	63—100	0,335	20,10	28	26,5
8	63—100	0,424	9,50	28	14,2

туры начала появления мельчайших воздушных пузырьков на внешней поверхности образца.

Следует отметить также, что при многократных экспериментах с насыщенной водой в диапазоне температур 20—50 °С, связанных с перестановкой образцов без промывки их горячей водой, происходит понижение температуры начала появления видимых пузырьков до 26—28° и увеличение концентрации выделяющихся пузырьков — образцы «ста-реют».

1-й метод, деаэрированная вода. Температура, соответствующая устойчивому появлению и исчезновению видимых пузырьков, достаточно высока и равна 92—93 °С для всех исследованных образцов. Установить заметное влияние условий проведения эксперимента на температуру начала появления пузырьков не удалось. Равновесная концентрация растворенного воздуха в воде при атмосферном общем давлении и температуре 92 °С составляет 0,16 от равновесной концентрации при 20 °С.

2-й метод, насыщенная вода. Давление на выходе образцов, при котором начинают появляться в потоке после образцов мельчайшие видимые пузырьки воздуха, зависит от условий проведения эксперимента.

Насыщенная вода пропускается после течения деаэрированной воды, а замена ее производится так, что исключается попадание воздуха в образцы. В этом случае при течении насыщенной воды появление пузырьков наблюдается при давлении после образцов 0,02 МПа практически одновременно для всех пяти образцов. При этом пузырьки не задерживаются на поверхности образца, а выносятся потоком из него. Если вслед за появлением пузырьков поддерживать постоянное давление после образцов, то наблюдается постепенное увеличение количества и размеров пузырьков в потоке. Если после появления пузырьков сохранять неизменной картину истечения с малым количеством появляющихся пузырьков, то для этого необходимо непрерывно повышать давление после образцов. В течение примерно 2 мин это давление повышается до предельного значения 0,089 МПа. После достижения этого состояния величина 0,089 МПа соответствует как исчезновению пузырьков при увеличении давления, так и появлению пузырьков при понижении давления ниже этой величины при подходе со стороны более высоких давлений. Причем это давление практически одинаково для всех пяти образцов.

Если после достижения установившегося состояния постепенно понижать давление после образцов, то наблюдается увеличение количества и размеров пузырьков в потоке, который принимает ярко выраженный двухфазный характер (рис. 2). Образцы герметично закреплены на входе стеклянных трубок и расположены в порядке увеличения обозначенных на трубках номеров слева направо. Поток направлен вверх.

Интересно отметить следующее качественное явление, наблюдаемое при истечении двухфазного потока из образца, когда колебательное уменьшение давления амплитудой больше 0,002 МПа сопровождается вылетом из образцов «облачка» пузырьков. Интенсивность вылетающего облачка пузырьков возрастает с увеличением амплитуды колебания давления и с уменьшением давления после образцов, а также зависит от характеристик образца.

Насыщенная вода пропускается через сухой образец или после продувки его воздухом. В этом случае в потоке сначала появляются крупные пузырьки воздуха, затем они исчезают. После при понижении давления появление мельчайших пузырьков в потоке наблюдается при давлении 0,075 МПа одновременно для всех образцов. Затем картина полностью повторяется и давление появления пузырьков возрастает до той же самой предельной величины 0,089 МПа. Таким образом, продувка образцов воздухом повышает минимальное начальное давление появления пузырьков от 0,02 до 0,075 МПа.

Все отмеченные по течению насыщенной воды во 2-м методе явления объясняются следующим образом. После течения деаэрированной воды пузырьков воздуха в образцах нет. При подаче насыщенной воды в начальный момент времени массовое зарождение первых пузырьков воздуха происходит при значительном пересыщении. Затем по мере образования и накопления пузырьков в пористой структуре условия выделения растворенного воздуха приближаются к равновесным. Это и приводит или ко всевозрастающему количеству пузырьков в потоке при постоянном давлении после образца, или к постепенному повышению давления, при котором мельчайшие пузырьки выносятся потоком.



Рис. 2. Двухфазный поток с пузырьками воздуха после образцов 1—5

Коллебательное уменьшение давления после образцов вызывает колебательное увеличение расхода, что и приводит к выталкиванию из пористой структуры части пузырьков в виде облачка.

При течении насыщенной воды через образцы после продувки их воздухом основная часть воздуха из сквозных каналов вымывается потоком в виде крупных пузырьков. Оставшиеся в полузакрытых порах воздушные пузырьки способствуют быстрому достижению условий равновесного выделения растворенного воздуха, что и вызывает появление видимых пузырьков в потоке при достаточно высоком давлении 0,075 МПа.

Равновесное содержание растворенного воздуха в воде при предельном давлении появления пузырьков в установившемся режиме составляет, согласно закону Генри, 0,89 от равновесного содержания в исходном состоянии. Это значение очень близко к величине 0,87, полученной по методу 1.

2-й метод, деаэрированная вода. Течение деаэрированной воды было организовано только через образцы с высоким начальным содержанием воздуха внутри пористой структуры; через сухие образцы или после течения насыщенной водой. В любом из этих случаев сначала наблюдается вытеснение воздуха из открытых поровых каналов в виде крупных пузырьков, затем происходит растворение в потоке воды оставшегося воздуха. Этот процесс осуществляется при постепенном понижении давления и завершается, когда давление еще достаточно велико. При дальнейшем понижении давления видимые пузырьки появляются в потоке при давлении 0,006 МПа. Затем это давление повышается и в установившемся режиме предельное давление, соответствующее появлению или исчезновению пузырьков, одинаково для всех образцов и составляет 0,01 МПа. Здесь происходят те же явления, что и при течении насыщенной воды, но только при значительно меньшей концентрации растворенного воздуха. Равновесная концентрация воздуха при давлении 0,01 МПа составляет 0,1 от концентрации в насыщенной воде при атмосферном давлении. Этот результат близок к ре-

ультату с деаэрированной водой при исследовании по 1-му методу — там получено значение 0,16.

Следует отметить, что давление, при котором зарождаются пузырьки воздуха в потоке внутри пористого образца, выше давления на выходе, так как пузырьки зарождаются, растут внутри образца и только после достижения размеров, соизмеримых со средним диаметром пор, выносятся потоком на внешнюю поверхность.

Учитывая это замечание и близость полученных по обоим методам результатов, можно считать, что в установившемся режиме зарождение газовых пузырьков и последующее выделение растворенного воздуха при течении воды в исследованных пористых металлах происходит в условиях, близких к равновесной насыщенности.

Исследование условий появления паровых пузырьков произведено по 1-му методу при постепенном повышении температуры воды перед



Рис. 3. Структура двухфазного пароводяного потока на внешней поверхности образца при течении подогретой до 120°C деаэрированной воды

входом в образец до 120°C. Определить температуру появления паровых пузырьков на внешней поверхности при атмосферном давлении не удалось по той причине, что при достижимой в условиях эксперимента предварительной деаэрации воды при температуре воды на входе в образец, начиная с 92°C, наблюдалось предварительное появление паровоздушных пузырьков. В результате этого при подходе к 100°C всегда наблюдалось значительное выделение пузырьков. При начальной температуре воды около 100°C и выше происходит постепенный переход от выделения паровоздушных пузырьков к паровым. Он состоит в следующем. С повышением температуры воды на входе от 100 до 102°C число центров и частота отрыва пузырьков возрастают настолько, что они выбегают цепочками и лопаются на поверхности жидкостной пленки, образуя на ней мельчайшую рябь и туман из микрокапель. Размеры пузырьков при этом уменьшаются до диаметра около 0,1 мм. При дальнейшем повышении температуры практически из каждой поры идут сплошные паровые микроструи. При этом начало области зарождения паровых пузырьков заглубляется с внешней поверхности внутрь образца, где увеличивающееся давление соответствует состоянию насыщения при начальной температуре воды. Температура внешней поверхности образца остается постоянной и равной температуре насыщения при атмосферном давлении. Пленка жидкости на поверхности образца становится рыхлой от пронизывающих ее бесчисленных паровых микроструй и белеет (рис. 3). При этом появляется и постепенно усиливается шум.

Таким образом, образование паровых пузырьков внутри пористых исследованных металлов происходит в условиях термодинамического равновесия. Этому в значительной степени способствует предварительное образование воздушных и паровоздушных пузырьков.

Вывод о соблюдении термодинамического равновесия при зарождении паровых пузырьков внутри пористого металла подтверждается также и результатами экспериментов по кипению различных жидкостей на поверхностях нагрева с пористым покрытием: воды [3—5], ацетона и этилового спирта [5], фреонов [6]. В этих экспериментах установлено, что перегрев поверхности нагрева, соответствующий началу появления пузырьков на поверхности пористого покрытия, очень мал и составляет 0,8—1,5 К. Причем следует отметить, что здесь измеряется температура

сплошной поверхности нагрева. Следовательно, перегрев пористого материала в месте зарождения пузырьков еще меньше вследствие подвода тепла теплопроводностью от сплошной поверхности.

### Figure Captions

Fig. 1. Air bubbling on the external sample surface.

Fig. 2. Two-phase flow with air bubbles after samples 1—5.

Fig. 3. Structure of the two-phase vapour-water flow on the external sample surface in the deaerated water heated up to 120 °C.

### Summary

The results of analytical and experimental study of the conditions of the formation of gas and vapour bubbles in the liquid flow in porous metals are presented.

### Литература

1. Лабунцов Д. А. Приближенная теория теплообмена при развитом пузырьковом кипении.— Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1963, № 1, с. 58—71.
2. Сумм Б. Д., Горюнов Ю. В. Физико-химические основы смачивания и растекания.— М.: Химия, 1976.— 231 с.
3. Стырикович М. А., Малышенко С. П., Андрианов А. Б., Коновалов С. И. Особенности кипения на поверхностях с нетеплопроводными пористыми покрытиями.— ДАН СССР, 1978, т. 241, № 2, с. 345—348.
4. Алешин А. Н., Кузма-Кичта Ю. А., Москвин В. Н., Сорокин Д. Н. Исследование теплообмена при парообразовании на поверхности с пористым покрытием.— ТВТ, 1980, т. 18, № 5, с. 1098—1101.
5. Абхат, Себан. Кипение и испарение воды, ацетона и этилового спирта в фитилях тепловых труб.— Теплопередача, сер. С, 1974, т. 96, № 3, с. 74—82.
6. Данилова Г. И., Иоффе О. Б., Дюндин В. А. и др. О теплообмене при кипении жидкостей на греющих поверхностях с капиллярно-пористыми покрытиями.— В сб. Температурный режим и гидравлика парогенераторов. Л.: Наука, 1978, с. 73—78.

Новополоцкий политехнический институт  
им. Ленинского комсомола Белоруссии,  
Институт тепло- и массообмена  
им. А. В. Лыкова АН БССР, г. Минск

08.04.81.

УДК 536.24

**В. Ф. Степанчук, В. В. Кожушко**

## КОНДЕНСАЦИЯ ПАРА НА ПЛАСТИНЕ ПРИ ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

*Аналитически исследован теплообмен при конденсации пара на вертикальной пластине. Приведена инженерная методика поверочного расчета теплообменника.*

Рассмотрим задачу о теплообмене при конденсации насыщенного пара на вертикальной пластине при поперечном движении охлаждающего теплоносителя по отношению к стекающей пленке конденсата. При этом принимаются такие же допущения, как и при выводе широко известной формулы Нуссельта [1]. Считается, что со стороны охлаждающего теплоносителя отсутствует перемешивание и его температура изменяется только в направлении движения. Последнее может иметь место при ламинарном движении и небольшом градиенте температуры охлаждающего теплоносителя в вертикальном направлении или при разделении потока большим числом параллельных каналов.

Задача ставится следующим образом: определить количество передаваемого тепла, толщину пленки конденсата, температурное поле ох-