

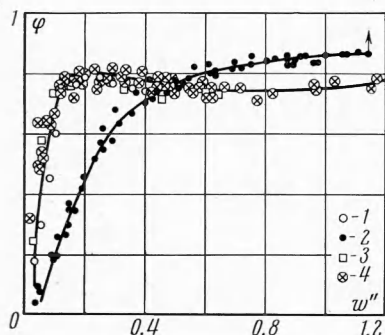
НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ НАСЫЩЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ГРАНИЧНОГО СЛОЯ ГАЗООБРАЗНОЙ ФАЗОЙ

И. Г. Маленков (Новосибирск)

В работе [1] сообщалось, что процессы кипения и барботажа оказались, как вытекает из гидродинамической теории кризисов кипения, физически родственными процессами в отношении общности развития критической перестройки пузырьковой структуры граничного слоя в пленочную.

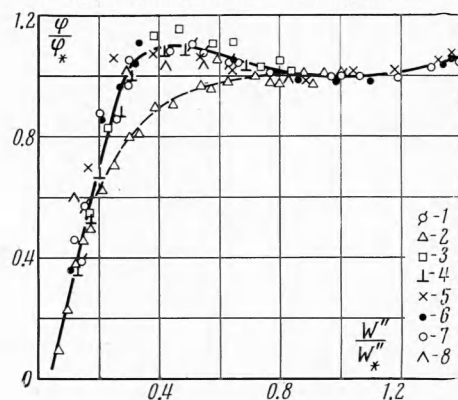
Ниже приводятся некоторые результаты изучения изменения газосодержания в двухфазном граничном слое как при кипении, так и при барботаже через пористую пластину в широком диапазоне нагрузок.

1. Изучение процесса насыщения пристенного слоя паром при кипении и газом при барботаже велось на установке, которая по своему устройству аналогична описанной в [1]. Отличие заключалось лишь в том, что она давала возможность проводить опыты и по кипению и по барботажу. Для этого необходимо было только сменить рабочий участок. В основу метода измерений величин, необходимых для вычисления газосодержания вблизи поверхности нагрева при кипении или пористой пластины при барботаже, была положена зависимость электропроводности двухфазной смеси от концентрации в ней паровых (газовых) пузырей.



Фиг. 1

Фиг. 1. Кипение: 1 — этанол, 2 — вода; барботаже через пористую пластину: 3 — этанол, 4 — вода



Фиг. 2

Фиг. 2. Кипение: 1 — этанол, 2 — вода, 3 — ацетон, 4 — метанол; барботаже через пористую пластину: 5 — вода, 6 — этанол, 7 — метанол, 8 — ацетон

В качестве датчика использовался зонд из константановой проволоки $\varnothing 20$ мк, который помещался у поверхности нагрева или пористой пластины на расстоянии $\sim D_0/2$. К зонду и пористой пластине (греющей пластине при кипении) подводилось переменное напряжение звуковой частоты.

Измерения электропроводности двухфазного пристенного слоя позволили получить данные об изменении газо-(паро-)содержания во всем диапазоне нагрузок. Опыты как по кипению, так и по барботажу были проведены на дистиллированной воде, этиловом и метиловом спиртах и ацетоне.

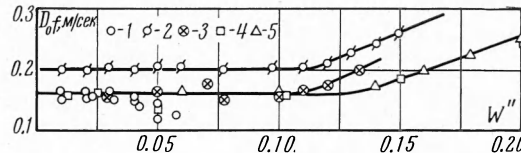
На фиг. 1 показаны типичные кривые изменения газосодержания ϕ при кипении и барботаже этилового спирта (с ними согласуются данные, полученные на метиловом спирте и ацетоне) и дистиллированной воды. По оси абсцисс отложена приведенная скорость w'' м/сек (в случае кипения $w'' = q / r\gamma''$), а по оси ординат — газосодержание ϕ .

Видно, что характер изменения газосодержания при барботаже жидкостей качественно одинаков и близок количественно. Некоторое отличие в ходе изменения паросодержания наблюдается при кипении воды. Для кривой газосодержания, соответствующей кипению и барботажу, например этанола, характерно увеличение до максимальной величины, а затем наступление некоторого спада, тогда как кривая, отражающая изменение ϕ при кипении воды, показывает монотонный рост во всем диапазоне нагрузок и не имеет экстремумов.

Однако, несмотря на несколько различное изменение ϕ (о причинах этого явления будет сказано ниже), можно различить существование как при кипении, так и при барботаже двух стадий, через которые проходит насыщение двухфазного пристенного слоя. Первая стадия представляет область свободного всплытия пузырей без заметного взаимодействия, вторая стадия — область интенсивного взаимодействия и слияния пузырей друг с другом.

Тождественность изменения газосодержания и существование двух отличающихся одна от другой по интенсивности областей насыщения яснее видны, если опытные данные представить в безразмерной форме (фиг. 2). Здесь φ_* и w_*'' — газосодержание и приведенная скорость легкой компоненты, соответствующие режиму, при котором совершается переход от пузырьковой структуры к пленочной. Видно, что данные по барботажу и кипению удовлетворительно группируются около одной кривой. Исключением составляют лишь некоторые точки для кипения воды, которые в области «горба» кривой ложатся несколько ниже (объединены пунктирной линией).

Фиг. 3. Барботаж через пористые листы: 1 — ртуть-вода, $26.5 \cdot 10^5$ н/м², 2 — вода-воздух, $40.0 \cdot 10^5$ н/м²; (опыты ЦКТИ): барботаж через пористую пластину: 4 — вода-азот; кипение: 5 — этанол



Опытные данные позволяют считать, что изменение газ (опаро-)содержания в основном определяется двумя величинами: удельной плотностью центров — источников пузырей n/F и диаметром всплывающих пузырей D_0 .

Действительно, если около пористой пластины или поверхности нагрева ограничить произвольный прямоугольный объем высотой, равной D_0 и площадью F , то

$$\varphi = \frac{V''}{V' + V''} = \frac{\pi}{6} \frac{n}{F} D_0^2 \quad (1)$$

Поскольку в первой области $D_0 = \text{const}$, то φ — линейная функция n/F , которая в свою очередь определяется величиной нагрузки по пару или газу. Отклонение изменения φ от линейности наступает тогда, когда слияние пузырей начинает играть заметную роль. Когда агломерация пузырей становится преобладающим процессом, величина n/F приближается к своему максимальному значению, изменение φ определяется величиной всплывающих пузырей.

В области интенсивного взаимодействия при кипении, когда все тепло реализуется на генерацию пара, можно определить

$$\frac{n}{F} = \frac{6q}{r_1''} \frac{1}{\pi D_0^3 f} = \frac{6w''}{\pi D_0^3 f} \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим

$$\varphi = w'' / D_0 f \quad (3)$$

Таким образом, во второй области паро(газо-)содержание определяется соотношением приведенной скорости пара (газа) и произведения диаметра пузырей D_0 на частоту следования их в данной точке. Произведение $D_0 f$ имеет размерность [м/сек] и отождествляется с относительной скоростью всплытия пузырей.

Вычисленные по формуле (3) из опытных данных значения $D_0 f$ (м/сек) показаны на фиг. 3 в виде графика $D_0 f = F(w'')$. Здесь приведены данные по барботажу через дырчатые листы в системах вода — воздух (разные давления) и вода — ртуть; по барботажу воздуха в воду через пористую пластину и по кипению этилового спирта. Видно, что в области свободного всплытия пузырьков $D_0 f$ также остается постоянной (т. е. пузырьки всплывают как одиночные), а в области интенсивного взаимодействия — линейно растет с нагрузкой. Видно также, что во всем диапазоне нагрузок $D_0 f$ имеет большую величину, нежели приведенная скорость.

Превышение $D_0 f$ над приведенной скоростью пара (газа) в первой области уменьшается с ростом нагрузки и в конце области принимает некоторую величину, которая в дальнейшем (во второй области) остается неизменной.

Поскольку в области свободного всплытия пузырей $D_0 f = \text{const}$, то величина газосодержания и здесь может быть определена из соотношения (3). Пропорциональность φ величине приведенной скорости нарушается лишь с развитием процесса слияния пузырей, когда $D_0 f \neq \text{const}$.

Величина газосодержания, при которой слияние пузырей начинает оказывать заметное влияние на процесс насыщения, легко определяется из следующего предположения: при нагрузке, которая вызывает сильную агломерацию, величина n/F становится столь большой, что растущие пузыри практически покрывают всю поверхность.

В этом случае

$$\frac{n}{F} \approx \frac{4}{\pi D_0^2}$$

Подстановка этой величины в (1) дает

$$\varphi \approx 2/3 \quad (4)$$

Это значение ϕ близко к полученному в опытах. Следовательно, в области $0 \leq \phi \leq 2/3$ процесс теплоотдачи при кипении в условиях естественной конвекции зависит в основном от удельной плотности центров парообразования n/F , которые являются своеобразными стоками тепла.

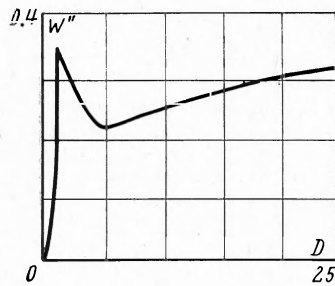
Во второй области газосодержание меняется мало (в пределах 10—15%) и может быть принято равным $\phi \approx 0.8$. Поскольку в этой области n/F приближается к своему максимальному значению, а доля сечения потока, занятая жидкостью, остается почти постоянной, то очевидно, что теплообмен во второй области определяется интенсивностью турбулентного омывания поверхности нагрева жидкостью, подтекающей из объема.

2. Выше отмечалось некоторое своеобразие насыщения граничного двухфазного слоя при кипении воды. Причины, вызывающие это отличие, кроются в следующем.

В первой области газосодержание зависит от величины n/F , которая может быть определена из соотношения (2). Из него видно, что n/F для различных жидкостей обратно пропорциональна величине теплоты парообразования r и отрывному диаметру пузыря

$$D_0 \sim \sqrt{\sigma / (\gamma' - \gamma'')}.$$

Для воды r и σ имеют значительно большие величины, чем для спиртов и ряда других жидкостей. Поэтому количество центров парообразования, возникающих при кипении воды, сравнительно невелико, увеличение их числа с нагрузкой происходит медленнее, поскольку каждый индивидуальный центр парообразования является более мощным стоком тепла. Замедленность прироста n/F в значительной мере ослабляет интенсивность роста газосодержания при увеличении нагрузки.



Фиг. 4. Зависимость $w''_0 = f(D_0)$

При кипении спиртов и других жидкостей, напротив, для отвода того же количества тепла (поскольку r и σ для них имеют меньшую величину) возникает большее число центров парообразования. В этом случае прирост числа центров парообразования с увеличением тепловой нагрузки сильнее, что и приводит к более интенсивному росту ϕ . Поэтому кривая $\phi = f(w''_0)$ при кипении воды имеет в первой области меньший угол наклона. Различие в размерах первообразных пузырей при кипении разных жидкостей также накладывает свой отпечаток на характер изменения газосодержания. Влияние размеров пузырей проявляется через скорости всплытия.

На фиг. 4 приведена общеизвестная зависимость $w''_0 = f(D_0)$. Видно, что она имеет довольно сложный характер и может быть разграничена на три области: область сток-совских скоростей, промежуточную или переходную область и область пульсационного движения пузырей. Размеры всплывающих пузырей с увеличением теплового потока изменяются, поэтому каждому значению q соответствует определенная скорость эвакуации пузырей из пристенной области. Газосодержание же в граничном слое, как видно из (3), зависит от скорости всплытия пузырей.

Из экспериментальных данных известно, что при закипании этилового спирта образуются пузыри, имеющие в подавляющем большинстве размеры менее 2 мм в диаметре. Многочисленные мелкие пузыри быстро заполняют граничный слой и уже при сравнительно низких нагрузках создают условия для максимального заполнения пристенной области газообразной средой. При приближении к ϕ_{\max} появляется стесненность движению пузырей, поэтому они начинают сливаться, образуя вторичные, более крупные. Скорость вновь образовавшихся пузырей будет отличаться от скорости всплытия первообразных пузырьков и, в зависимости от размера, будет соответствовать либо промежуточной области (тогда скорость всплытия будет уменьшаться, а ϕ расти), либо пульсационной области (тогда скорость всплытия несколько возрастает, а газосодержание уменьшается). Размеры вторичных пузырей, образовавшихся от слияния, а следовательно и их скорости, будут зависеть от размеров первообразных пузырей и количества их, слившихся в новом пузыре.

Поскольку в случае кипения спиртов размеры первообразных пузырей малы, то вначале слияние порождает новые пузыри с размерами, соответствующими промежуточной области графика $w''_0 = f(D_0)$, поэтому газосодержание растет не только за счет роста n/F , но и за счет уменьшения скорости эвакуации паровой фазы. Отсюда, максимальное значение ϕ_{\max} спиртов достигается при нагрузках, далеких от критического режима. Когда же тепловая нагрузка возрастает до той величины, при которой наступает слияние не только первообразных, но и вторичных и т. д. пузырей, то создаются условия для порожждения пузырей, имеющих диаметр, близкий или равный 5 мм. Тогда скорость всплытия пузырей начинает вновь расти, а газосодержание уменьшается. Существование таких изменений в скорости всплывающих пузырей и является причиной появления своего рода «горба» на кривой $\phi = f(w''_0)$.

В случае кипения воды, как уже говорилось, размеры пузырей значительно больше, а их расселение по поверхности нагрева реже. Поэтому процесс укрупнения пузырей затягивается и происходит не так интенсивно, как при кипении спиртов. Кроме того, для образования новых пузырей с размерами, близкими к 5 мм, необходимо слияние значительно меньшего числа первообразных пузырей (при кипении воды диаметр первообразных пузырей достигает 2.5—3.0 мм), т. е. быстрее осуществляется переход в пульсационную область движения.

В силу этих причин воздействие изменения скорости всплытия пузырей в значительной мере ослаблено, и φ при кипении воды растет монотонно. Накопление пара в граничном слое совершается медленно, без флуктуаций и не приводит к образованию «горба» на кривой $\varphi = f(w'')$.

При барботаже различных жидкостей через пористую пластину, в том числе и воды, кривые $\varphi = f(w'')$ качественно полностью аналогичны кривой, характерной для кипения спиртов. Объясняется это тем, что вдувание газа во все жидкости производилось через одну и ту же пористую пластину. В этом случае отрывной диаметр пузыря определяется [2].

$$R_0 = \left(\frac{3\sigma R_1}{2(\gamma' - \gamma'')} \right)^{1/3} \quad (5)$$

т. е. влияние сил поверхностного натяжения здесь гораздо слабее и пропорционально $\sigma^{1/3}$ (процесс барботажа протекает без фазовых превращений).

Из опытов было установлено, что на микропорах применявшейся пластины средние размеры возникавших пузырей для разных жидкостей колебались в пределах 0.2—1.5 мм. Опыты также показали, что отношение n/F при барботаже растет с нагрузкой несколько быстрее, чем даже при кипении спиртов (фиг. 1).

Определяющее влияние размеров первообразных пузырей видно также при рассмотрении опытных данных по барботажу через дырчатые листы. В этих случаях, как правило, употребляются дырчатые листы с отверстиями не менее 2 мм. Отрывной диаметр пузырей, образующихся на таких отверстиях, оказывается настолько большим, что слияние только двух пузырей может оказаться достаточным для образования укрупненного пузыря размерами более 5 мм. Поэтому кривые $\varphi = f(w'')$ при барботаже через дырчатые листы изменяются плавно. Уменьшение размеров отверстия в дырчатом листе приводит к появлению на этой кривой максимума или «горба».

Об этом свидетельствуют данные работы [3], в которой было установлено, что, начиная с отверстий, равных 0.5 мм и меньше, кривые $\varphi = f(w'')$ обретают характерный «горб».

Поступила 15 IX 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Маленков И. Г. Критические явления в процессах барботажа и кипения. ПМТФ, 1963, № 6.
2. Кутателадзе С. С., Стрыкович М. А. Гидравлика двухфазных систем. Госэнергоиздат, 1958.
3. Wallis G. B. Some hydrodynamic aspects of two-phase flow and boiling. International developments in heat transfer, part II, 1961.
4. Sims G. E., Aktürk V., Evans-Zutterodt K. — Simulation of pool boiling transfer by gas injection at the interface. Internat. J. Heat and Mass Transfer, 1963, vol. 6, No 3.
5. Zuber N. Nucleate boiling. The region of isolated bubbles and the similarity with natural convection. — Internat. J. Heat and Mass Transfer, 1963, vol. 6, No 1.
6. Zuber N. Problem gidrodinamic diffusion in two-phase flow. Докл. на Всесоюз. конф. по тепломассообмену. Минск, 1964.

КРИТЕРИАЛЬНОЕ ОПИСАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ПЛАМЕНИ ГОМОГЕННОЙ СМЕСИ

В. К. Баяв (Новосибирск)

Анализ процесса горения и обобщения экспериментального материала по распространению пламени в различных топочных устройствах при использовании теории подобия значительно облегчил бы использование накопленного на практике материала при проектировании и отработке топочных устройств.

Несмотря на сложность процесса горения, исключающую возможность полного его моделирования, в большинстве случаев можно использовать ограниченное число критериев подобия для достаточно точного, с точки зрения практики, описания отдельных сторон процесса горения. Примером этому служат обобщения данных по срыву и проскоку — крайним случаям распространения пламени [1-3] и др.