

## ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ ПО ГИДРАВЛИЧЕСКОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ КИПЕНИИ

*А. П. Орнатский (Киев)*

Изучению закономерностей гидравлического сопротивления в условиях поверхностного кипения посвящен ряд работ (см., например, [1-7]).

Ниже излагается некоторый метод обобщения опытных данных для области больших недогревов (более 40 — 50° С).

Рассмотрим зависимости температуры стенки  $t_+$  и гидравлического сопротивления канала  $\Delta p$  от величины удельного теплового потока  $q$  при постоянных значениях; весовой скорости  $\gamma w$ , среднего недогрева по длине канала  $\Delta t$  и давления  $p$ , приведенные на фиг. 1. На этих кривых можно выделить следующие области.

1. Область неизотермического движения без парообразования в пристенном слое, где температура стенки  $t_+$  меньше температуры насыщения  $t_-$  (участок 1—2). В этой области с увеличением  $q$  происходит рост  $t_+$  и уменьшается  $\Delta p$ .

2. Переходная область — участок 2—3. В точке 2 имеем  $t_+ = t_-$ . Величина теплового потока, соответствующая этой точке, обозначена  $q'$ . При увеличении теплового потока в некотором интервале его изменения имеет место рост температуры стенки с прежней интенсивностью — участок 2—3. Когда перегрев стенки достигает определенной величины, в пристенном слое начинается процесс парообразования — точка 3.

При дальнейшем увеличении теплового потока число действующих центров парообразования возрастает, в связи с чем гидродинамическая обстановка в пристенном слое жидкости постепенно изменяется. Эта область характерна постепенным снижением темпа роста  $t_+$  с увеличением  $q$  и переходом от снижения  $\Delta p$  к его увеличению. Заканчивается она в некоторой точке 5.

3. Область развитого поверхностного кипения — участок 5—6. Начинается в точке 5 и заканчивается в точке 6, когда наступает так называемый кризис теплообмена. Эта область характерна очень малым изменением температуры стенки  $t_+$  и значительным ростом гидравлического сопротивления  $\Delta p$  с увеличением  $q$ .

Как было указано, концом последней области является точка возникновения кризиса кипения.

В работах [1, 3] в качестве начала области поверхностного кипения принята точка 4, в которой пересекаются продолжения линий 1—2 и 5—6, построенные по опытным данным. Такой метод едва ли можно считать целесообразным. Точка 4 лежит в переходной области. Если принять ее за начальную точку, то при исследовании в обработку будут включаться данные, полученные на участке 4—5, что может исказить закономерности, присущие области развитого поверхностного кипения.

То же будет, если принять в качестве начала точку 3. Определение точки 3 экспериментальным путем очень сложно, так как требует проведения визуального определения числа действующих центров парообразования [8].

Правильно было бы брать в качестве начала области поверхностного кипения точку 5. Однако для определения ее параметров нет нужных соотношений из-за недостаточной изученности теплообмена в переходной области 2—5.

Поэтому представляется целесообразным применение следующего метода определения точки 5.

Начало переходной области — точка 1 — может достаточно точно определяться из условий  $t_+ = t_-$ . Через точку 7 на кривой  $\Delta p = f(q)$  проводится горизонтальная линия до пересечения с продолжением этой кривой. Полученная точка 8 принимается за начало области развитого поверхностного кипения. По своему положению эта точка близка к точке 5. Тепловой поток, соответствующий точке 8, обозначим

$$q_0 = q' + \Delta q \quad (1)$$

Здесь  $q'$  — тепловой поток при  $t_+ = t_-$ ,  $\Delta q$  — изменение величины теплового потока между точками 7 и 8. В опытах  $\Delta q$  может определяться из графика  $\Delta p = f(q)$  как величина отрезка 7—8, а для расчетов должна даваться зависимость

$$\Delta q = f(\gamma W, \Delta t, p) \quad (2)$$

Гидравлическое сопротивление канала при поверхностном кипении  $\Delta p$  представим в виде

$$\Delta p = \Delta p' + \Delta p'' \quad (3)$$

Здесь гидравлическое сопротивление канала  $\Delta p'$  в точке 8 (по условию ее определения равно сопротивлению в точке 2) может быть найдено из соотношений, известных для области 1—2, исходя из условия  $t_+ = t_-$ ; величина  $\Delta p''$  — прирост гидравлического сопротивления  $\Delta p$ , обусловленный поверхностным кипением. Прирост гидравлического сопротивления канала  $\Delta p''$  обусловлен процессом парообразования в пристенном слое и вызывается следующими причинами.

(а) Возникновение, рост и последующая конденсация паровых пузырей повышают интенсивность массообмена между пристенным слоем и ядром потока, что должно приводить к росту гидравлического сопротивления вследствие изменения количества движения в потоке. Массообмен между пристенным слоем и ядром потока будет расти с увеличением числа действующих центров парообразования  $z$ , частоты образования пузырей  $u$  и среднего диаметра пузырей  $d$ .

(б) До начала движения пузыря по поверхности нагрева его воздействие на поток будет в определенной мере тождественно воздействию выступа шероховатости, т. е. наличие паровых пузырей в пристенном слое создает «паровую шероховатость», что тоже может вызывать увеличение гидравлического сопротивления. Это предположение, высказанное Тзяном, приводится в работе [9].

Размер выступов «паровой шероховатости» может характеризоваться средним значением наибольшего диаметра  $d$  пузыря. Число одновременно существующих выступов паровой шероховатости будет пропорционально  $z$  и  $u$ .

(в) Скользящий по поверхности нагрева пузырь до момента его отрыва движется со скоростью, меньшей скорости омывающей жидкости. Это вызывает дополнительные гидродинамические возмущения в потоке и может быть причиной увеличения гидравлического сопротивления. Эта составляющая будет зависеть от величины адгезии жидкости — твердое тело, которая является функцией поверхностного натяжения  $\sigma$ , и краевого угла  $\theta$  [10].

(г) Величина гидравлического сопротивления при поверхностном кипении зависит от потери энергии на ускорение потока. Последнее вызывается двумя причинами. При малых недогревах паровой пузырь не будет конденсироваться в пристенном слое жидкости, а, оторвавшись от поверхности, уйдет в ядро потока и будет существовать там некоторый период времени, что вызовет потерю на ускорение потока вследствие того, что  $\gamma'' < \gamma'$ . Потеря энергии на ускорение среды может также возникать из-за увеличения средней скорости благодаря «загромождению» сечения паровыми пузырями.

Этот фактор, вероятно, оказывает заметное влияние на гидравлическое сопротивление лишь в каналах малых сечений.

На основании указанных выше возможных причин роста гидравлического сопротивления при поверхностном кипении можно полагать, что прирост гидравлического сопротивления в области поверхностного кипения  $\Delta p''$  должен существенно зависеть от величины  $q'' = q - q_0$ , представляющей прирост теплового потока в области поверхностного кипения. Тогда основными режимными параметрами, определяющими при течении заданной жидкости величину  $\Delta p''$ , являются тепловой поток  $q''$ , весовая скорость  $\gamma w$ , давление в канале  $p$ , недогрев ядра потока  $\Delta t$  и диаметр канала  $d$ .

Для выяснения степени влияния указанных параметров были проанализированы опытные данные, опубликованные в работах [1-7], и установлено следующее.

1. По данным работы [2], при постоянных значениях  $\gamma W$ ,  $p$  и  $\Delta t$  величина  $\Delta p''$  увеличивается с ростом  $q$ . При этом физические константы жидкости в ядре потока неизменны, а в пристенном слое меняются очень мало.

2. По данным той же работы величина  $\Delta p''$  при  $p$  и  $\Delta t = \text{const}$  и равных значениях  $q''$  тем больше, чем выше весовая скорость  $\gamma W$ .

3. Прирост гидравлического сопротивления  $\Delta p''$  при равных значениях  $\gamma W$  и  $\Delta t$  практически не зависит от давления [3] в диапазоне его изменения от 10 до 150—175 *ата*.

При изменении давления и постоянстве недогрева изменяются температуры ядра потока и пристенного слоя, что обуславливает изменение физических свойств жидкости и пара. Как показывает опыт, это обстоятельство не оказывает заметного влияния на  $\Delta p$  и  $\Delta p''$ . Поэтому можно полагать, что гидродинамические возмущения, вызываемые «паровой шероховатостью» и скольжением паровых пузырей по поверхности, которые меняются с изменением давления, не оказывают заметного влияния на гидравлическое сопротивление в условиях поверхностного кипения. То же можно сказать и о потере, обусловленной ускорением потока. Таким образом, при  $p = \text{var}$ , а  $\gamma W$  и  $\Delta t = \text{const}$  прирост сопротивления  $\Delta p''$  обусловлен только изменением  $q''$ .

4. Прирост гидравлического сопротивления  $\Delta p''$  при равных значениях  $p$ ,  $\gamma W$  и  $q''$  тем больше [2], чем меньше недогрев  $\Delta t$ . Поэтому в число величин, определяющих  $\Delta p''$ , следует включить калорическую характеристику жидкости  $c$  — теплоемкость единицы массы.

5. С целью выяснения влияния диаметра трубы  $d$  на величину  $\Delta p''$  были проведены специальные опыты на трубках диаметром  $d = 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0$  и  $5.0$  *мм* с отношением  $l/d = 23$  и  $24$  при давлениях  $p = 25-50$  *ата*, средних недогревах  $\Delta t = 50, 100$  и весовой скорости  $\gamma W = 10 \cdot 10^3$  *кг/м<sup>2</sup>сек*. Результаты опытов показали, что  $\Delta p''/l$  уменьшается с увеличением диаметра трубы  $d$  от 1 до 5 *мм*.

Так как «паровая шероховатость» не оказывает заметного влияния на  $\Delta p''$ , то увеличение последнего с уменьшением диаметра трубы  $d$  происходит, по-видимому, за счет увеличения отношения периметра к площади сечения, что повышает величину массы жидкости на единицу площади сечения, перемещаемую пузырями из пристенного слоя в ядро потока

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что основной причиной, вызывающей рост гидравлического сопротивления при поверхностном кипении при недогревах более 50° С, является перенос массы жидкости из пристенного слоя в ядро потока, вызванный процессом парообразования, и обусловленное этим изменение количества движения в потоке.

При этом практически

$$\frac{\Delta p''}{l} = f(q'', W, \Delta t, c, d) \quad (4)$$

Из указанных пяти величин формально может быть образован один безразмерный комплекс вида

$$K'' = \frac{\Delta p'' c \Delta t d}{q'' W l} \quad (5)$$

Таким образом, при условии несущественного влияния других факторов рассматриваемый процесс описывается зависимостью

$$K'' = \text{const} \quad (6)$$

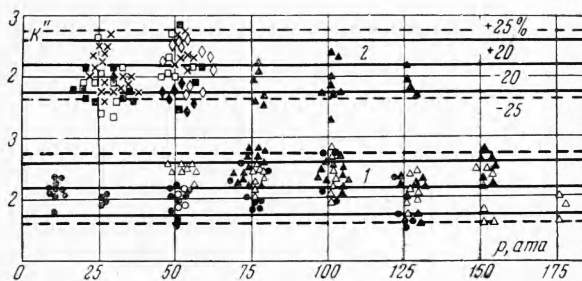
Обработка измерений производилась с применением комплекса (5).

По оси ординат откладывался безразмерный комплекс  $K''$ , а по оси абсцисс — величина давления. Теплоемкость  $c$  в выражении (5) бралась при температуре, равной  $1/2(t_- + t)$ , где  $t$  — температура ядра потока.

Так как зависимость  $\Delta q$  от  $\gamma W$ ,  $\Delta t$  и  $p$  еще не установлена [2], а результаты значительной части опытов не позволяли с достаточной точностью определить эту величину путем построения графиков  $\Delta p = f(q)$  и  $t_{\pm} = f(q)$ , определение величины  $q''$  при обобщении опытных данных производилось из выражения

$$q'' = q - q_- \quad (7)$$

Опытные данные при значениях  $q'' < (2 \div 3) 10^6$  ккал/м<sup>2</sup>час как относящиеся к переходной зоне 7—8 (фиг. 1) при обобщении не использовались. В указанной системе была произведена обработка около 440 опытных точек, полученных



Фиг. 2

в опытах с водой, где весовая скорость изменялась от  $5 \cdot 10^3$  до  $30 \cdot 10^3$  кг/м<sup>2</sup>сек, недогрев — от 50 до 200°, давление — от 10 до 175 ата и диаметр трубы — от 1 до 5 мм.

Результаты обработки показали, что около 70% опытных точек укладывается с разбросом  $\pm 20\%$  и около 86% — с разбросом  $\pm 25\%$  возле обобщающей линии, которая представляет собой горизонталь с ординатой  $A = 2.15$ , если  $q''$  в ккал/м<sup>2</sup>сек.

На фиг. 2 в качестве примера показаны результаты обработки опытных данных, полученных на трубке диаметром 2 мм при весовой скорости  $20 \cdot 10^3$  кг/м<sup>2</sup>сек (линия 1) и весовой скорости  $30 \cdot 10^3$  кг/м<sup>2</sup>сек, на трубках диаметром 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0 и 5.0 мм при весовой скорости  $10 \cdot 10^3$  кг/м<sup>2</sup>сек (линия 2). Таким образом, выражение (5) подтверждается опытными данными. Это выражение может быть интерпретировано как расширение аналогии Рейнольдса на область поверхностного кипения.

Выражение (5) может быть представлено в виде

$$\frac{\Delta p''}{\rho W^2} = A \frac{l}{d} \frac{q''}{\rho W c \Delta t}, \quad \text{или} \quad E'' = A \frac{l}{d} S'' \quad (8)$$

Здесь модификации критерия Эйлера  $E$ , а в правой — модификация критерия Стентона для области поверхностного кипения  $S$  отмечена штрихами.

Полученное выражение свидетельствует о единстве процессов переноса тепла и молярного обмена импульсами, обусловленными процессом парообразования в пристенном слое.

Результаты по обобщению опытных данных по приросту гидравлического сопротивления в области поверхностного кипения  $\delta$ — $\delta$  позволили перейти к рассмотрению вопроса обобщения опытных данных по полному гидравлическому сопротивлению  $\Delta p$  в этой области. Из выражения (8), подставляя значение  $A = 2.15$ , получаем

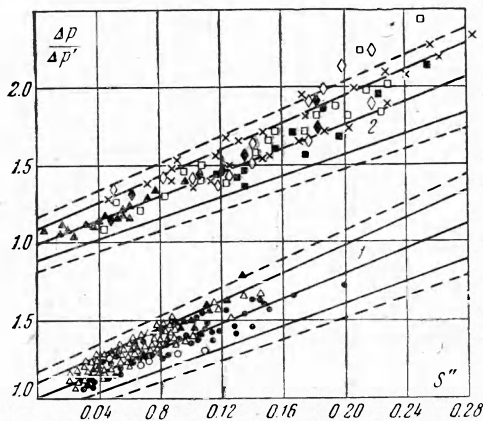
$$\Delta p'' = 4.3 S'' \frac{l}{d} \frac{\rho W^2}{2} \quad (9)$$

Если рассматривать гидравлическое сопротивление в области развитого поверхностного кипения как сумму  $\Delta p = \Delta p' + \Delta p''$ , то относительный прирост гидравлического сопротивления, обусловленный развитием в пристенном слое процесса парообразования, равен

$$\frac{\Delta p}{\Delta p'} = 1 + \frac{\Delta p''}{\Delta p'} \quad (10)$$

Как установлено в результате дополнительной обработки опытных данных, полученных в [2],  $\Delta p'$  в исследованных условиях может быть определено из выражения

$$\Delta p' = \xi \frac{l}{d} \frac{\rho W^2}{2} = \xi_0 \left( \frac{\mu_+}{\mu} \right)^{0.25} \frac{l}{d} \frac{\rho W^2}{2} \quad (11)$$



Фиг. 3

Здесь  $\mu_+$  — вязкость жидкости при температуре стенки,  $\mu$  — вязкость жидкости при температуре ядра потока,  $\xi_0$  — коэффициент сопротивления при изотермическом движении, который определяется в соответствующих границах значений критерия  $R$  по формулам Блазиуса и Никурадзе.

Подставляя значения  $\Delta p''$  и  $\Delta p'$  в выражение (10), получим

$$\frac{\Delta p}{\Delta p'} = 1 + 4.3 \frac{S''}{\xi_0 (\mu_+/\mu)^{0.25}} \quad (12)$$

где  $\mu_+$  берется при  $t_+ = t_-$ .

Результаты обработки тех же опытных данных в системе координат, согласно (12), показали, что около 89% точек отклоняются от линии, выражающей уравнение (12), не более +10%, и около 97% — не более  $\pm 15\%$ .

На фиг. 3 в качестве примера показаны результаты этой обработки тех же опытных данных, что и на фиг. 2. Расположение точек и условные обозначения те же. Из этого следует, что уравнение (12) вполне удовлетворительно обобщает опытный материал, полученный в широком диапазоне изменения определяющих параметров.

Автор благодарит С. С. Кутателадзе за советы при обсуждении данной статьи.

Поступила 9 10 1964

#### ЛИТЕРАТУРА

1. По л е т а в к и н П. Г. Гидравлическое сопротивление при поверхностном кипении воды. Теплоэнергетика, 1959, № 12.
2. О р н а т с к и й А. П., К и ч и г и н А. М. Исследование гидравлического сопротивления при течении недогретой воды в трубке малого диаметра и больших тепловых потоках. Теплоэнергетика, 1961, № 8.
3. Т а р а с о в а Н. В., О р л о в В. М. Исследование гидравлического сопротивления при поверхностном кипении воды в трубе. Теплоэнергетика, 1962, № 6.
4. О р н а т с к и й А. П., Г л у щ е н к о Л. Ф. Исследование гидравлического сопротивления при поверхностном кипении воды в кольцевых каналах. Теплофизика высоких температур, 1963, т. 1, № 2.
5. О р н а т с к и й А. П., Г л у щ е н к о Л. Ф., Ч е р и б а й В. А. О влиянии давления на гидравлическое сопротивление при поверхностном кипении. Теплофизика высоких температур, 1965, т. 2, № 6.
6. B u c h b e r g H., R o m i e F., L i p k i s R., G r e e n f i e l d M. Heat transfer and fluid mechanics Institute. 1951. Preprints of Papers Held at Stanford University.
7. R o h s e n o w W. M., C l a r k J. A. Heat transfer and fluid mechanics Institute. 1951. Preprints of Papers Held at Stanford University.
8. Т р е щ е в Г. Г. Экспериментальное исследование механизма процесса поверхностного кипения. Сб. «Теплообмен при высоких тепловых нагрузках и других специальных условиях». Госэнергоиздат, 1959.
9. S a b e r s k i R., M u l l i g a n H. Friction and Heat — Exchange Relationship in Bubble Boiling. Jet Propuls., 1955, vol. 25, No. 1.
10. А д а м Н. К. Физика и химия поверхности. ОГИЗ, Гостехиздат, 1947.