

ОБОБЩЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ОПЫТОВ ПО КРИЗИСУ КИПЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ НА ОСНОВЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ

Л. Е. Михайлов

(Москва)

Приводятся результаты обработки экспериментальных данных по кризису кипения в условиях вынужденного движения трех спиртов и воды при помощи приближенного термодинамического подобия. Предложена расчетная формула.

Эмпирические зависимости для кризиса кипения при вынужденном движении жидкости имеют вид

$$q_* = f(p, w, \Delta t)$$

где q_* — критическая плотность теплового потока, p — давление, w — скорость жидкости, $\Delta t = T - T_s$ — недогрев до температуры насыщения.

На основе данных работы И. И. Новикова [1] может быть предложена зависимость, универсальная для подобных веществ

$$\frac{q_*}{c_0 p_*} = f\left(\frac{p}{p_*}, \frac{w}{c_0}, \frac{\Delta t}{T_*}, \frac{c_{v_0}}{R}\right) \quad \left(c_0 = \sqrt{\frac{gRT_*}{\mu}}\right)$$

где p_* — критическое давление, c_{v_0} — молярная теплоемкость вещества при бесконечном расширении, R — газовая постоянная, c_0 — скорость звука в веществе, находящемся в идеальном газовом состоянии, при критической температуре T_* .

На практике применяется более простая зависимость, в которой два последних параметра объединяются в виде произведения

$$\frac{\Delta t}{T} \frac{c_{v_0}}{R} = \frac{\Delta t}{r} \frac{c_{v_0}}{\mu}$$

где r — скрытая теплота парообразования.

Величину c_{v_0}/μ в этом выражении можно заменить теплоемкостью $c_p = c_p(t)$ [2], и записать

$$\frac{\Delta t}{r} \frac{c_{v_0}}{\mu} \rightarrow \frac{\Delta t c_p}{r} = \frac{\Delta i}{r}$$

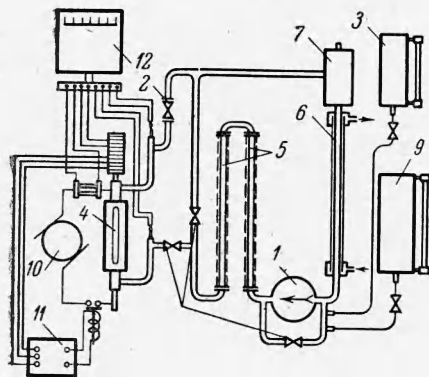
Таким образом, обобщенная зависимость между приведенными величинами, существенными для кризиса кипения при вынужденном движении, принимает вид

$$\frac{q_*}{c_0 p_*} = f\left(\frac{p}{p_*}, \frac{w}{c_0}, \frac{\Delta i}{r}\right)$$

Исследованию кризиса кипения при вынужденном движении воды посвящен ряд работ (например, [3-10]). Для других жидкостей экспериментальных данных опубликовано мало (см., например, [11]). Материал для обобщения на основе термодинамического подобия нужно было получить в эксперименте с различными, преимущественно органическими жидкостями.

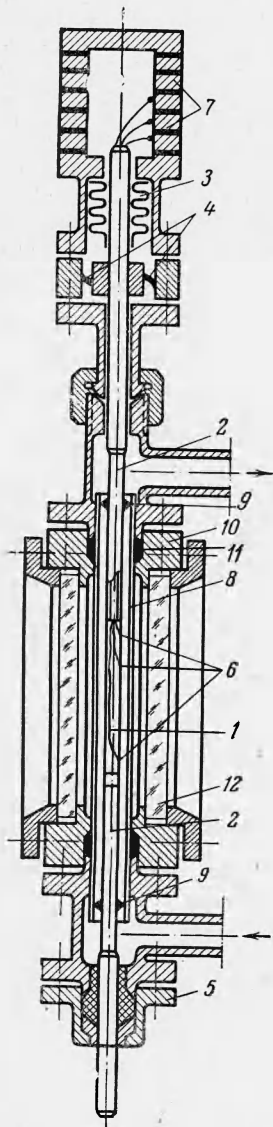
Экспериментальная установка для исследования кипения органических жидкостей (фиг. 1) представляет собой замкнутый циркуляционный контур, по которому жидкость прокачивается бессальниковым вихревым насосом с экранированным приводом 1. Расход жидкости в контуре измеряется при помощи набора сдвоенных диафрагм 2 прибором ЭПИД-02. Давление в контуре создается при помощи парового котла 3 с автоматическим управлением. Контур включает в себя рабочий участок 4, вспомогательные нагреватели 5, холодильник 6 и газоотделитель 7. Расход жидкости через рабочий участок и холодильник регулируется при помощи вентилей 8. Жидкостью контур заполняется из резервуара 9. Рабочий участок питается постоянным током низкого напряжения от генератора 10 типа АНД 1500/750. Фиксация наступления кризиса осуществляется автоматически, электронным прибором 11, который отключает питание рабочего участка.

Автоматически, потенциометром 12 типа ЭПП-09 фиксируются также основные измеряемые величины — ток и падение напряжения на тепловыделяющем элементе, а также температуры жидкости на входе и выходе рабочего участка.



Фиг. 1. Схема экспериментальной установки Новика

Рабочий участок (фиг. 2) позволяет вести эксперимент при внешнем омывании жидкостью тепловыделяющего элемента 1. Этот элемент изготовлен из тонкостенной нержавеющей или никелевой трубки. Он нагревается постоянным током, который подводится к нему по медным шинам 2. Верхняя шина уплотнена при помощи сальфона 3, который компенсирует тепловые расширения тепловыделяющего элемента, а электрический контакт осуществляется при помощи гибких медных проводников 4. Верхняя шина находится под нулевым потенциалом и соединена с корпусом установки. Нижняя шина выводится через фторопластовый изолирующий сальник 5.

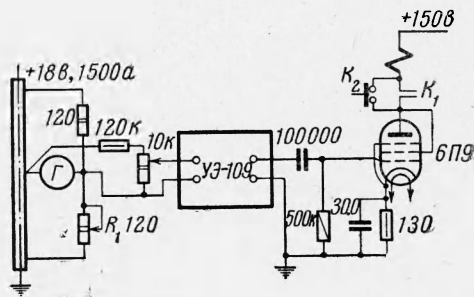


Фиг. 2. Рабочий участок

Кольцевая щель, по которой протекает жидкость, образована тепловыделяющим элементом и стеклянной трубкой 8. Смещению тепловыделяющего элемента от центрального положения препятствуют фиксаторы 9. Стеклянная трубка уплотнена в корпусе рабочего участка 10 при помощи сальников 11 из специальной резины. Корпус имеет окна с плоскими стеклами 12 размером 100×10 мм, что позволяет вести наблюдение за процессом.

Тепловыделяющий элемент разгружен внутри газом. Стеклянная трубка разгружена снаружи жидкостью.

Внутри тепловыделяющего элемента приварены потенциальные выводы 6 из нихрома диаметром 0,2 мм, изолированные стеклянным чулком. Они выводятся по сверлению в верхней шине и припаиваются к изолированным контактным кольцам 7. Потенциальные выводы служат для фиксации наступления кризиса. Фиксатор кризиса реагирует на изменение сопротивления трубки в месте образования кризиса и не чувствует изменения сопротивления при равномерном прогреве тепловыделяющего элемента. Это достигается включением двух участков тепловыделяющего элемента в качестве двух плеч моста (фиг. 3). В начальный момент мост уравновешивается при помощи потенциометра R_1 и сигнал, снимаемый с его диагонали, будет равен нулю. При изменении сопротивления одного из участков тепловыделяющего элемента балансировка моста нарушается и в диагонали его появляется сигнал, который усиливается усилителем УЭ-109 (применяемым в приборе ЭПП-09) и управляет электронным реле, стоящим на выходе автомата. Реле отключает возбуждение машин постоянного тока, питающих рабочий участок. Длительность процесса отключения была измерена при помощи шлейфового



Фиг. 3. Фиксатор кризиса

осциллографа и оказалась равной $0.02 \div 0.03$ сек. Опыт работы на установке показал, что применение автоматического фиксатора кризиса очень полезно. На одном тепловыделяющем элементе он позволяет получить до пятидесяти точек.

Опыты всегда начинались с настройки чувствительности фиксатора кризиса. Чувствительность считалась установленной правильно, если в момент наступления кризиса в верхней части тепловыделяющего элемента наблюдалась неяркая короткая вспышка, либо в кипящем слое жидкости на поверхности элемента образовывалась отчетливо видимая зона пленочного кипения. Особенно хорошо пленочное кипение

наблюдалось на никелевых тепловыделяющих элементах при лобовом освещении. Кроме того, при большом недогреве кипение сопровождается звуковыми явлениями. При повышении нагрузки трубка издает резкий звук, который быстро стихает только в непосредственной близости от кризиса.

Всего на установке было проведено три серии опытов: на воде, этиловом спирте и бутиловом спирте.

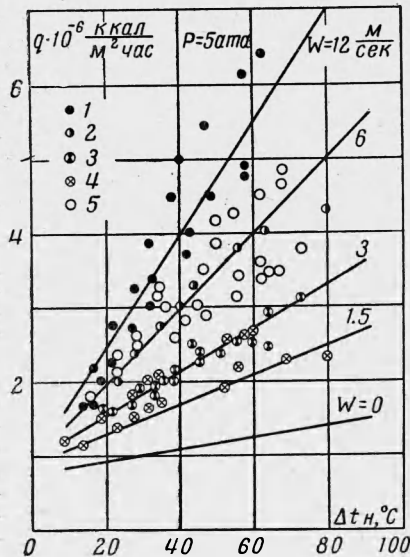
Опыты на воде проводились для тарировки установки. Всего было получено около ста экспериментальных точек, причем часть до работы на спирту, а часть — после.

Согласование полученных результатов с результатами Л. Д. Додонова [4] и П. И. Поварнина [8] — удовлетворительное.

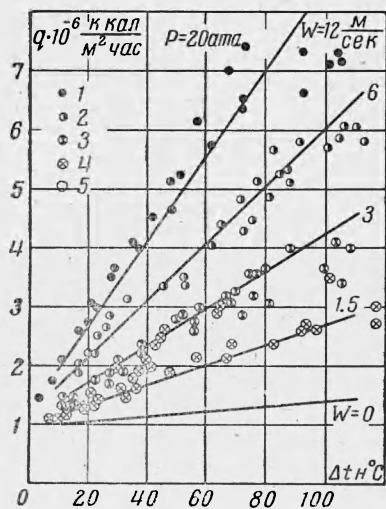
В опытах на этиловом спирте охвачен диапазон скоростей от 1.5 до 12 м/сек при давлениях 5, 10, 20, 30, 40 и 50 атм. Опыты проводились на тепловыделяющих элементах из нержавеющей стали при ширине кольцевого зазора $\delta = 2.6$ мм и длине обогреваемого участка $l_0/2\delta = 15$. Полная длина канала $l/2\delta = 44$. Всего серия содержит около 700 экспериментальных точек (фиг. 4).

В опытах было обнаружено влияние приработки поверхности тепловыделяющих элементов. Ввиду того что спирт в установке был весьма чистым (ректификат в контакте с нержавеющей сталью, медью и фторопластом), отложение осадков на тепловыделяющем элементе не наблюдалось до давления 20 атм.

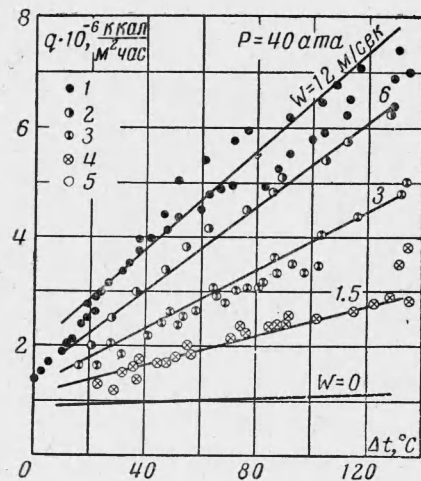
При более высоких давлениях на тепловыделяющем элементе отлагался осадок красноватого цвета, который со временем темнел. Оказалось при этом, что точки, полученные на чистом блестящем участке, лежат на 20 ÷ 30% ниже, чем точки, полученные на рабочем участке, покрытом осадком. На графиках фиг. 4 точки, полученные на чистых тепловыделяющих элементах, не закрашены.



Фиг. 4 а



Фиг. 4 б



Фиг. 4 в

Фиг. 4. Графики второй серии опытов: 1 — $w = 12$ м/сек, 2 — $w = 6$ м/сек, 3 — $w = 3$ м/сек, 4 — $w = 1.5$ м/сек, 5 — точки, снятые на чистом, неприработанном участке

Проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными по этиловому спирту П. И. Поварнина [17].

При давлениях 5, 10 и 20 *ата* точки И. П. Поварнина ложатся в пределах разброса наших экспериментов. Отклоняются вниз только точки при $p = 20 \text{ ата}$, $w = 10 \text{ м / сек}$. При 40 *ата* точки П. И. Поварнина и С. Т. Семенова лежат много ниже наших и имеют большой разброс. Как предполагает П. И. Поварнин, это происходит из-за влияния отложений на стенках тепловыделяющего элемента продуктов разложения спирта. Кризис в опытах работы [17] фиксировался по перегибу в ходе записи температуры стенки тепловыделяющего элемента. Но такой перегиб будет иметь место не только при наступлении кризиса, но и при резком начале отложения осадков, т. е. ранее наступления кризиса. Кроме того, в опытах работы [17] наблюдалось скалывание отложений со стенки с образованием кризиса в месте скола. Это приводит к «выбросу» точек вниз.

Опыты на бутиловом спирте были проведены в том же диапазоне скоростей и давлений, что и опыты предыдущей серии. Качественная картина, полученная в результате этих опытов, аналогична картине, полученной на этиловом спирте. Поэтому экспериментальные точки и графики в статье не приводятся.

Следует отметить, что влияния приработки поверхности тепловыделяющего элемента на получаемые результаты заметить не удалось. По-видимому, это связано с малой термической стойкостью бутилового спирта.

Очевидно, что для обобщения следует выбрать группу подобных жидкостей. Критерием подобия может служить критический коэффициент [12]

$$K_* = \frac{\mu p_* V_*}{RT_*}$$

Более наглядное представление о степени подобия жидкостей может дать сравнение их физических параметров в относительных координатах [13, 14].

Очевидно также, что абсолютные свойства жидкостей должны отличаться возможно больше. Критерием различия жидкостей можно считать комплексы, которые скомбинированы из критических параметров и универсальных констант и имеют размерности существенных для изучаемого процесса величин [1, 2].

Для обобщения были выбраны результаты опытов, проделанных на воде и спиртах метиловом, этиловом и бутиловом. Критические коэффициенты и размерные комплексы для них приведены в таблице ($(c_p / r)_{0.01}$ означает, что c_p и r выбраны при $p / p_* = 0.01$).

Наименование	μ	K_*	c_0	$c_0 p_*$, 10^{-8}	$(c_p / r)_{0.01}$, 10^3
Вода	18	4.15	546	10.4	2
Спирт метиловый	32	4.56	365	2.5	2.2
Спирт этиловый	46	4.07	306	1.67	2.37
Спирт бутиловый	74	3.6	250	1.055	3.9

Из рассмотрения таблицы можно сделать следующие выводы.

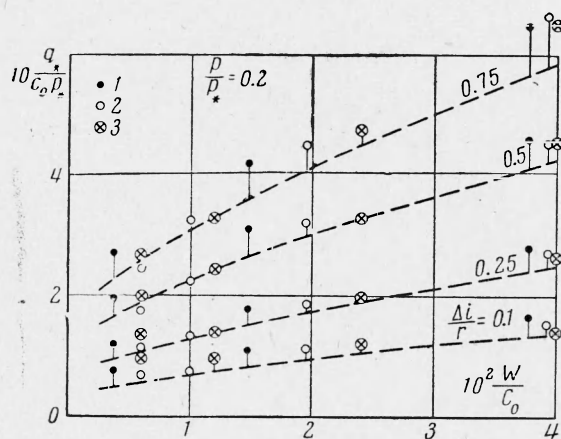
1. Выбранные вещества имеют близкие значения критического коэффициента. (Отклонения от среднего значения $\pm 12\%$.)

2. Размерные комплексы плавно зависят от молекулярного веса μ .

3. Различие размерных комплексов для выбранных веществ значительно. В частности, значения величины $c_0 p_*$, являющейся масштабом q_* , различаются для воды и бутилового спирта почти в десять раз.

Такое большое масштабное различие — факт благоприятный, так как позволит установить с полной достоверностью наличие или отсутствие подобия явлений кризиса кипения в различных жидкостях.

Кроме того, в результате сравнения физических параметров выбранных жидкостей в приведенных координатах получено, что максимальное различие наблюдается



Фиг. 5. 1 — вода, 2 — спирт этиловый, 3 — спирт бутиловый

для скрытой теплоты парообразования r (до 15%), а различие остальных параметров — плотности, поверхностного натяжения, температуры насыщения — не превышает $5 \div 10\%$.

Для обобщения были использованы следующие опытные данные.

По воде — данные А. П. Орнатского [15, 16], П. И. Поварнина и С. Т. Семенова [8].

По метиловому спирту — данные П. И. Поварнина и С. Т. Семенова.

По этиловому спирту — данные П. И. Поварнина, С. Т. Семенова и данные автора.

По бутиловому спирту — данные автора.

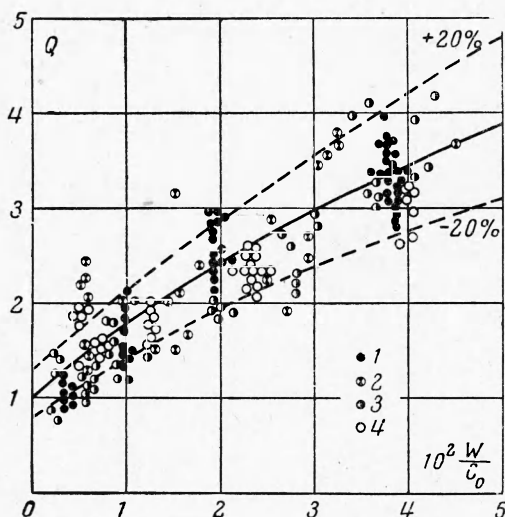
Обработка опытных данных проводилась в два этапа. Во-первых, опытные данные были пересчитаны в системе приведенных величин

$$\frac{q_*}{c_0 p_*} = f\left(\frac{p}{p_*}, \frac{w}{c_0}, \frac{\Delta i}{r}\right)$$

и нанесены на графики, аналогичные фиг. 5.

Для полученных кривых была подобрана формула

$$\frac{q_*}{c_0 p_*} = 3 \cdot 10^{-4} \left(1 - \frac{p}{p_*}\right) \left(1 + 6.7 \frac{\Delta i}{r}\right) \times \left[1 + 0.8 \left(10^2 \frac{w}{c_0}\right)^{0.8}\right] \quad (1)$$



Фиг. 6. 1 — вода, данные [8], 2 — спирт метиловый; 3 — спирт этиловый; 4 — спирт бутиловый

$p/p_* < 0.1$ и $p/p_* > 0.6$ будет отличаться от даваемого формулой, причем в основном изменится значение коэффициента при $(w/c_0)^{0.8}$. Этот коэффициент возрастет в несколько раз и будет сильно зависеть от p/p_* .

На фиг. 6 показано, как укладываются на кривую, построенную по формуле (1), экспериментальные точки, использованные для обобщения.

Здесь по оси ординат отложена величина

$$Q = q_* \left[3 \cdot 10^{-4} c_0 p_* \left(1 - \frac{p}{p_*}\right) \left(1 + 6.7 \frac{\Delta i}{r}\right) \right]^{-1}$$

На фиг. 6 нанесены следующие точки: по воде — П. И. Поварнина и С. Т. Семенова [8], по метиловому спирту — данные П. И. Поварнина и С. Т. Семенова, по этиловому спирту — данные автора, полученные на чистых тепловыделяющих элементах, по бутиловому спирту — данные автора. Разброс экспериментальных точек на фиг. 6 не превышает в основном $\pm 30\%$.

На фиг. 6 не нанесены экспериментальные точки по воде А. П. Орнатского [15, 16] и по этиловому спирту — данные автора, полученные на загрязненных тепловыделяющих элементах. Разброс точек здесь такой же, но все точки лежат выше формулы на $20 \div 25\%$.

Это расхождение можно объяснить, по-видимому, различием свойств поверхности в опытах, в частности различием величины поверхностного натяжения.

Заметим, что рассмотрение явления кризиса кипения с термодинамических позиций позволяет связать особенности процесса с такими характеристиками веществ, как критические параметры и молекулярный вес и исключить из рассмотрения многие другие физические параметры, такие как вязкость, поверхностное натяжение и т. п.

Поступила 24 X 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Н о в и к о в И. И. Условие подобия процессов передачи тепла при переменных свойствах жидкости. Применение теории термодинамического подобия к явлению кризиса при кипении жидкости. Госэнергоиздат. Сб. «Вопросы теплоотдачи и гидравлики двухфазных сред», 1961.

2. В у к а л о в и ч М. П., Н о в и к о в И. И. Техническая термодинамика. Госэнергоиздат, 1952.
3. Ч и р к и н В. С., Ю к и н В. П. Кризис теплосъема в потоке некипящей воды для кольцевого зазора. ЖТФ, 1956, № 7.
4. А л а д ь е в И. Т., Д о д о н о в Л. Д., У д а л о в В. С. Критические тепловые нагрузки при течении воды в трубах. Атомная энергия, 1959, т. 6, № 1.
5. З е н к е в и ч Б. А., С у б б о т и н В. И. Критические тепловые нагрузки при вынужденном движении воды, не догретой до кипения. Атомная энергия, 1957, т. 4, № 8.
6. З е н к е в и ч Б. А. Критические тепловые нагрузки при вынужденном движении в трубах воды с ядром, не догретым до температуры насыщения в интервале давлений 100—210 атм. Атомная энергия, 1958, т. 4, № 1.
7. З е н к е в и ч Б. А., С у б б о т и н В. И., Т р о я н о в М. Ф. Критические тепловые нагрузки при продольном омывании пучков труб водой, не догретой до температуры насыщения. Атомная энергия, 1958, т. 4, № 4.
8. П о в а р н и н П. И., С е м е н о в С. Т. Исследование кризиса кипения при течении недогретой воды в трубах малых диаметров при высоких давлениях. Теплоэнергетика, 1959, № 4.
9. Д о р о щ у к В. Е., Ф р и д Ф. П. Исследование критических тепловых нагрузок от стенки к воде и влажному водяному пару при давлении 170 ата. Сб. под ред. Н. А. Доллежаля. Атомиздат, 1958.
10. М и р о п о л ь с к и й З. Л., Ш и ц м а н М. Е. Исследование температурного режима вертикальной парогенерирующей трубы при высоких давлениях. Сб. под ред. Н. А. Доллежаля, Атомиздат, 1958.
11. С т е р м а н Л. С., С т ю ш и н Н. Г. Исследование зависимости критических тепловых потоков от скорости циркуляции. ЖТФ, 1952, т. XXII, вып. 3.
12. Н о в и к о в И. И. Условия термодинамического подобия реальных веществ. Некоторые вопросы инженерной физики. Сб. трудов МИФИ. М., 1957.
13. Б о р и ш а н с к и й В. М. Учет влияния давления на теплоотдачу и критические нагрузки при кипении на основе теории термодинамического подобия. Госэнергоиздат. Сб. «Вопросы теплоотдачи и гидравлики двухфазных сред», 1961.
14. П о в а р н и н П. И. Расчет некоторых физических параметров теплоносителя методом термодинамического подобия. Теплоэнергетика, 1962, № 6.
15. О р н а т с к и й П. П. Влияние длины и диаметра трубы на величину критического теплового потока при вынужденном движении воды, не догретой до температуры насыщения. Теплоэнергетика, 1960, № 6.
16. О р н а т с к и й А. П., К и ч и г и н А. М. Критические тепловые нагрузки при кипении недогретой воды в трубах малого диаметра в области высоких давлений. Теплоэнергетика, 1962, № 6.
17. П о в а р н и н П. И. Исследование кризиса кипения при течении 96% этилового спирта в условиях недогрева. Теплоэнергетика, 1962, № 12.

ИЗУЧЕНИЕ МЕХАНИЗМА КИПЕНИЯ ПРИ БОЛЬШИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКАХ ПОСРЕДСТВОМ КИНОСЪЕМКИ

Н. Н. Мамонтова

(Новосибирск)

Первые исследования механизма кипения посредством кино съемки были проведены 25—30 лет назад [1, 2] для тепловых потоков с малыми плотностями (с современной точки зрения).

В одной из последних работ Вествотера [3] с помощью скоростной кино съемки при атмосферном давлении исследовалось пузырьковое кипение метанола в случае больших тепловых потоков с интенсивностью q [ккал / м² час], примерно до критического значения $q = q_{*}$, при котором происходит смена пузырькового режима кипения пленочным режимом. Было обнаружено, что в этом случае величина отрывного диаметра парового пузыря D_0 [мм], частота отрыва паровых пузырей u [сек⁻¹] и скорость роста паровых пузырей D_{0u} [мм / сек] зависят от плотности теплового потока.

Подробное исследование механизма процесса кипения в движущейся недогретой жидкости было проведено Г. Г. Трещевым [4]. Были получены кривые распределения величин максимальных диаметров D , периодов образования пузырей τ и число центров парообразования при изменении режима кипения. Однако перенести эти данные на кипение полностью насыщенной жидкости не представляется возможным.

Ниже излагаются результаты первого этапа исследования механизма кипения насыщенной жидкости при свободной конвекции.