

КИПЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ЖИДКОСТЕЙ ПРИ ПОНИЖЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ

Н. Н. Мамонтова (Новосибирск)

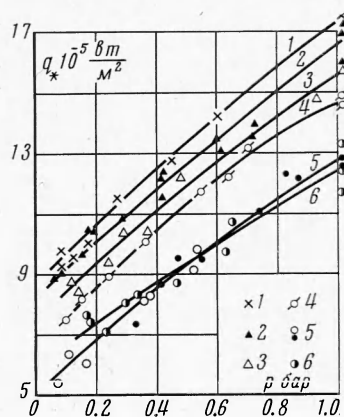
Изучению кипения жидкостей при пониженных давлениях посвящено сравнительно небольшое количество работ. Так, в 1956 г. Ван-Стрален [1] измерил критические потоки при кипении воды и ряда смесей на тонкой проволоке в интервале 50—760 мм рт. ст. Было отмечено увеличение отрывного диаметра паровых пузырей и уменьшение числа центров парообразования с понижением давления.

В работе [2] изучался механизм кипения воды в области давлений 0.4—1 кг/см². Критические тепловые потоки для воды на проволоке диаметром 0.5 мм определялись в работе [3]. В работе [4] изучался механизм пузырькового кипения ряда органических жидкостей при низких давлениях на проволоке диаметром 0.5 мм. Авторы этой работы показали, что при достаточно низких давлениях паровые пузыри перестают возникать несмотря на то, что температура поверхности заметно выше температуры насыщения под плоскостью. Ранее в работах [1,3] было отмечено, что на тонких нагревателях отсутствует режим пузырькового кипения и за режимом естественной конвекции сразу наступает переходной режим к пленочному кипению. В работе [5] изучался механизм пузырькового кипения воды в интервале давлений 0.2—1 кг/см².

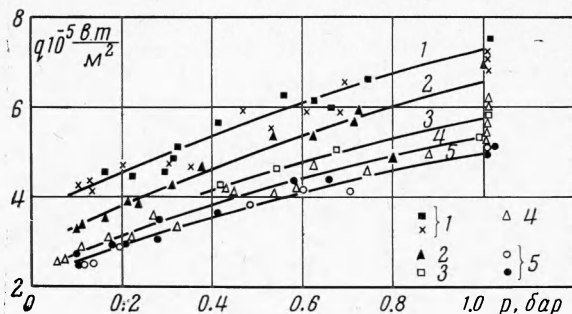
Обозначения

- | | |
|---|--|
| A — тепловой эквивалент работы; | D_n — отрывной диаметр пузыря; |
| g — ускорение силы тяжести; | T'' — абсолютная температура насыщенного пара; |
| σ — коэффициент поверхностного натяжения; | T_w — температура стенки; |
| γ' — удельный вес жидкости на линии насыщения; | q_* — критический тепловой поток; |
| γ'' — удельный вес пара; | τ — время контакта жидкости с поверхностью нагрева; |
| r — скрытая теплота парообразования; | τ'' — время роста парового пузыря; |
| D — диаметр нагревателя; | F_{0-1} — число Фруда |

1. В описываемых опытах определялась первая критическая плотность теплового потока q_* на горизонтальных трубках диаметрами от 0.2 до 5 мм при температуре насыщения в условиях свободной конвекции. Давления менялись от 0.05 до 1 бар. Длина рабочих участков 60 мм. Поверхности нагрева «прирабатывались» под атмосферным давлением при больших тепловых потоках примерно в течение 30 мин. Экспериментальная установка представляет замкнутый контур, состоящий из прямоугольного сосуда-кипятильника, конденсатора, трубопроводов и запорной арматуры. Кипятильник снабжен смотровыми стеклами размером 50×70 мм. Для создания нужного разрежения установка вакуумировалась при помощи механического вакуумного насоса типа ВН-2МГ. Давление определялось при помощи образцового вакуумметра класса 0.5, а при давлениях ниже 0.1 бар — ртутным манометром. Мощность теплового потока на рабочем участке измерялась ваттметром типа Д-539. Для измерения температуры жидкости и стенки трубки использовались хромель-алюмелевые термопары, э. д. с. которых определяли потенцио-



Фиг. 1



Фиг. 2

метром Р2-1. Термопара, при помощи которой определяли температуру стенки, помещалась внутри рабочего участка. Температура наружной поверхности вычислялась по формуле, учитывающей перепад температур в стенке трубки.

Результаты опытов представлены в виде зависимости q_* [Вт/м²] от давления p [бар] для дистиллированной воды — на фиг. 1, для этилового спирта (концентрация

96% по объему) — на фиг. 2 и для бензола — на фиг. 3. Точки 1, ..., 6 на фиг. 1 соответствуют диаметрам 0.8, 1.5, 2.0, 0.5, {3.2 и 5.0} и 0.3 мм. На фиг. 2 точки 1, ..., 5 соответствуют диаметрам (0.5 и 0.8), 1.5, 0.2, 2.0, (3.2 и 5.0) мм. На фиг. 3 точки 1, ..., 5 соответствуют диаметрам 0.5, 0.8, 1.5, 2.0, (3.2 и 5.0) мм. В опытах с водой применялись поверхности, обработанные по восьмому классу, в опытах с бензолом и этиловым спиртом использовали поверхности, обработанные крупнозернистой наждачной бумагой по четвертому классу чистоты ГОСТ-2789-59.

Как видно из графиков, значения q_* уменьшаются с понижением давления и зависят от размера нагревателя. Наибольшие значения q_* получаются для нагревателей диаметром 0.5—1.5 мм, для трубок 3.2 и 5.0 мм значения q_* одинаковы. В процессе опытов обнаружено влияние аккумуляции тепла в стенке. Поэтому для рабочих участков брались трубки примерно одинаковой толщины 0.25—0.35 мм. Для трубок с толщиной стенки 0.15 мм значения q_* для воды получились на 10% ниже, чем для трубок того же диаметра с толщиной стенки 0.35 мм. Влияние толщины стенки и диаметра на q_* исследовалось в работе [6].

На фиг. 4 даны результаты опытов для воды, этилового спирта и бензола в виде зависимости критерия устойчивости двухфазного граничного слоя

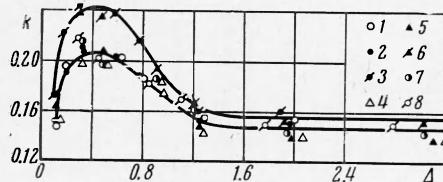
$$k = \frac{q_*}{r \sqrt{g\gamma''} \sqrt[4]{\sigma(\gamma' - \gamma'')}} \quad \text{от } \Delta = D \left(\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''} \right)^{-1/2}$$

где точкам 1, 2, 3 для воды соответствуют $p = 1.0, 0.5$ и 0.2 бара. Точкам 4, 5, 6 для спирта соответствуют $p = 1.0, 0.5$ и 0.2 бара, а для бензола точкам 7 и 8 соответствуют $p = 1.0$ и 0.2 бара, D — диаметр нагревателя.

В области $0.2 < \Delta < 1$ наблюдается максимум k ; в области $\Delta < 0.2$ величина k уменьшается; при $\Delta > 1.6$ имеет место автомодельность относительно линейного размера. Для атмосферного давления и выше такая зависимость была получена раньше в [7]. Характер этой зависимости сохраняется и для вакуума, однако для воды и этилового спирта значение k увеличивается с уменьшением p при малых Δ (на фиг. 4 при $p = 0.2$ бар) и практически не зависит от p при $\Delta > 1.5$.

Для бензола увеличение k не наблюдается при $p \approx 0.2$ бар.

2. Для изучения процесса кипения под вакуумом проводилась скоростная кино-



Фиг. 4

съемка камерами «ПЕНТАЦЕТ-35» и «ПЕНТАЦЕТ-16» со скоростью от 1000 до 2500 кадр/сек. При съемках поверхностями нагрева служили трубки размером 2 и 3.2 мм и изолированные пластины шириной 3—5 мм с такой же обработкой поверхности, как указано выше. Результаты киносъемок и визуальные наблюдения показали, что картина кипения жидкостей при $p < 0.3$ бар имеет ряд особенностей.

А. Образуются большие паровые пузыри со значительно меньшей частотой отрыва, чем при более высоких давлениях. Количество центров парообразования резко уменьшается. При $p < 0.1$ бар для спирта и при $p < 0.2$ бар для воды образуются паровые пузыри диаметром более 20 мм. При таких разрежениях рост пузырей имеет взрывной характер и сопровождается треском. Наблюдаются большие пульсации температуры поверхности. С повышением давления отрывные диаметры уменьшаются. На характер процесса кипения в этих условиях оказывает влияние и тепловая нагрузка. В таблице приведены данные по отрывному диаметру D_0 , частоте отрыва U и средней скорости роста пузырей на поверхности нагрева $W_0 = D_0 / \tau''$ в момент отрыва при разных давлениях и нагрузках. Эти величины получены осреднением из 10—30 измерений. При малых нагрузках образуются крупные пузыри с низкой частотой отрыва (1—3 пузыря в сек), притом действие каждого центра парообразования нерегулярно. С ростом нагрузки при постоянном давлении увеличивается частота отрыва (или зарождения) пузырей, кипение становится более регулярным, уменьшаются пульсации температуры поверхности, растет число центров парообразования, однако не столь значительно, как при более высоких давлениях. При дальнейшем повышении

тепловой нагрузки наблюдается переход от режима простых, изолированных пузырей к сложным, которые образуются в результате слияния как с соседними пузырями на поверхности, так и с ранее оторвавшимися в объеме. Обработка такого типа пузырей не производилась.

На фиг. 5 приведены фотографии кипения этилового спирта на трубке диаметром 3.2 мм при давлении $p = 0.15$ бар и тепловых потоках:

а) $q = 0.6 \cdot 10^5$ Вт/м², б) $q = 1.2 \cdot 10^5$ Вт/м², в) $q = 1.8 \cdot 10^5$ Вт/м².

Отрывные диаметры при постоянном p и разных тепловых потоках (таких, при которых еще не происходит слияния пузырей), как следует из таблицы, меняются сравнительно мало. Увеличение частоты зарождения U происходит за счет сокращения времени нагревания τ' жидкости около центра парообразования (т. е. времени контакта жидкости с поверхностью), а время роста пузыря на поверхности τ'' остается примерно постоянным.

p , бар	q , Вт/м ²	D_0 , мм	U , сек ⁻¹	W_0'' , см/сек	L , мм	δ_0
Вода						
0.12	$2.8 \cdot 10^5$	27.0	9.0	56.0	2.66	10.15
0.15	$1.0 \cdot 10^5$	26.0	1.5	53.0	2.65	9.8
0.15	$2.0 \cdot 10^5$	22.5	4.0	51.0	2.65	8.5
0.15	$3.85 \cdot 10^5$	25.0	13.5	58.0	2.65	9.43
0.18	$0.8 \cdot 10^5$	18.0	4.0	47.5	2.64	6.82
0.18	$1.6 \cdot 10^5$	18.5	11.0	49.0	2.64	7.00
0.18	$3.3 \cdot 10^5$	20.5	22.0	55.0	2.64	7.75
0.30	$0.8 \cdot 10^5$	15.0	6.0	43.0	2.60	5.77
0.30	$1.6 \cdot 10^5$	19.0	15.0	49.5	2.60	7.3
0.50	$0.8 \cdot 10^5$	6.8	15.0	33.0	2.56	2.66
0.50	$1.6 \cdot 10^5$	10.0	20.0	35.5	2.56	3.90
0.65	$0.8 \cdot 10^5$	4.6	27.0	31.0	2.53	1.82
1.01	$0.8 \cdot 10^5$	2.5	33.0	23.0	2.50	1.0
Этиловый спирт						
0.06	$0.6 \cdot 10^5$	28.5	3.0	59.5	1.715	16.6
0.06	$1.3 \cdot 10^5$	27.0	12.0	59.0	1.715	15.75
0.15	$0.30 \cdot 10^5$	18.0	2.0	45.5	1.68	10.7
0.15	$0.60 \cdot 10^5$	15.0	15.0	44.0	1.68	8.93
0.15	$1.3 \cdot 10^5$	17.0	18.0	48.0	1.68	10.1
0.18	$0.75 \cdot 10^5$	9.7	15.0	39.0	1.67	5.8
0.18	$1.4 \cdot 10^5$	9.6	20.0	40.0	1.67	5.75
0.31	$0.6 \cdot 10^5$	6.3	26.0	30.5	1.64	3.85
0.43	$0.3 \cdot 10^5$	3.2	27.0	24.0	1.615	1.98
1.01	$0.3 \cdot 10^5$	1.1	85.0	14.0	1.550	0.7
Бензол						
0.160	$4.3 \cdot 10^4$	15.0	5.0	48.0	1.80	8.34
0.173	$6.8 \cdot 10^4$	13.0	—	40.0	1.795	7.25
0.204	$4.3 \cdot 10^4$	10.5	8.0	40.5	1.785	5.88
0.375	$3.0 \cdot 10^4$	3.5	—	27.0	1.73	2.02

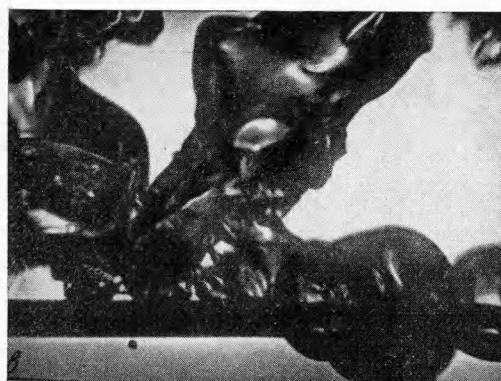
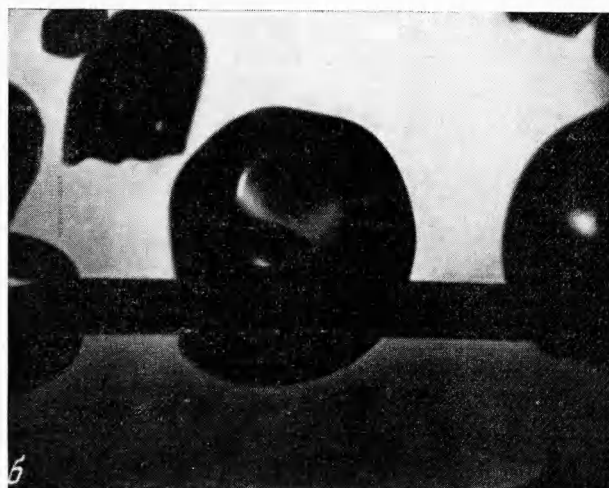
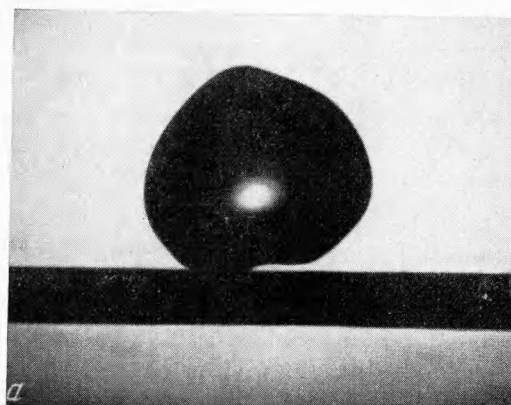
При давлениях выше 0.3—0.4 бар механизм процесса кипения приближается к механизму кипения при атмосферном давлении, т. е. уменьшаются отрывные диаметры, увеличивается частота образования пузырей, а число центров парообразования становится значительным уже при небольших нагрузках.

В работах [8,9] указывается, что при кипении в области больших тепловых потоков образуются крупные паровые пузыри, которые растут с большой скоростью на поверхности; поэтому в балансе сил, действующих на пузырь в момент отрыва, необходимо учитывать силу сопротивления жидкости, для которого

$$\frac{\pi D_0^3}{6} (\gamma' - \gamma'') = \pi D_0 \sigma f(\theta) + \xi \frac{\pi D_0^2}{4} \gamma' \frac{W_0''^2}{2g}$$

Отсюда можно получить безразмерные группы

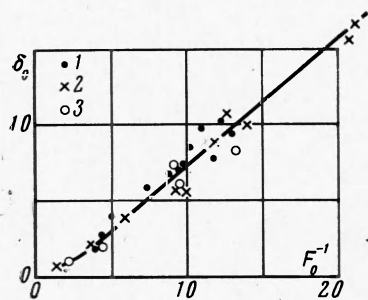
$$\delta_0 = \frac{D_0}{L}, \quad F_0^2 = \frac{g^2 \sigma}{W_0''^4 (\gamma' - \gamma'')}, \quad \vartheta = \frac{\gamma' - \gamma''}{\gamma'} f(\theta) \quad \left(L = \left(\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''} \right)^{1/2}, \quad W_0'' = \frac{D_0}{\tau''} \right)$$



Фиг. 5

Здесь F_0^{-1} — число Фруда, W_0'' — средняя скорость роста пузыря на поверхности в момент отрыва. Коэффициент сопротивления ξ для плоского сфероида ~ 1 . Средний краевой угол для воды, этилового спирта и бензола при изменении давления изменяется мало, по нашим опытам — от 42 до 50°.]

На фиг. 6 в координатах δ_0 и $1/F_0$ приведены опытные данные из таблицы по кипению воды (1), этилового спирта (2) и бензола (3).



Фиг. 6

Б. Активными центрами парообразования могут быть впадины и царапины на поверхности нагрева [10,11]. Размеры их должны быть порядка критического размера зародышей паровой фазы, который определяется выражением

$$R_{\min} = \frac{2\sigma T'' A}{r \gamma'' \Delta T}$$

С понижением давления значение $R_{\min}$ увеличивается в несколько раз. Так, при $p = 0.1$ бар величина $2\sigma T'' A / r \gamma''$ для воды и этилового спирта увеличивается примерно в 10 раз по сравнению с атмосферным давлением, а соответствующие температурные напоры $\Delta T = T_w - T''$, при которых начинается кипение, увеличиваются в

~ 3 раза. Следовательно, $R_{\min}$ возрастает в 3—4 раза. Увеличение радиуса зародышей приводит к торможению процесса образования пузырьков на гладких поверхностях. Кипение затруднено и начинается при относительно высоких тепловых потоках.

Так, для дистиллированной воды при $p = 0.1$ бар на полированной поверхности (восьмой класс частоты) развитое кипение начинается при тепловой нагрузке $q \approx 2 \cdot 10^5$ $\text{см}/\text{м}^2$, что составляет ~ 0.25 q_* (диаметр нагревателя 2 мм).

Состояние поверхности нагрева, степень ее шероховатости оказывают влияние на процесс кипения при низких давлениях. Так этиловый спирт, бензол хорошо смачивают поверхности нагрева, и зарождение паровых пузырей еще более затруднено. В опытах с кипением спирта и бензола на полированных поверхностях уже при $p \approx 0.5$ бар кипение возникает только тогда, когда $q \geq 1 \cdot 10^5$ $\text{см}/\text{м}^2$.

Сразу за режимом естественной конвекции взрывообразно возникает неустойчивая пленка, через некоторое время она разрушается и начинается обычное пузырьковое кипение. Возникновение подобного неустойчивого режима зависит также от скорости ввода нагрузки. При медленном наращивании нагрузки может возникнуть пузырьковый режим кипения. При давлениях ниже 0.3—0.2 бар на гладких поверхностях возникает устойчивый режим пленочного кипения без перехода через пузырьковый режим. На грубообработанных поверхностях этот переход от естественной конвекции к пленочному режиму отодвигается в область более низких давлений. На проволоке 0.2 мм, которую нельзя грубо обработать, значения критических тепловых потоков были определены до 0.4 бар. Ниже этого давления возникает пленочный режим кипения.

Поступила 25 X 1965

ЛИТЕРАТУРА

1. Van Stralen S. J. D. Heat transfer to boiling binary liquid mixtures at atmospheric and sub-atmospheric pressures. Chem. Engng Sci., 1956, vol. 5, p. 290—296.
2. Nishikawa K., Urakawa K. A photographic study of pool boiling at low and atmospheric pressures. Trans. Japan Soc. Mech. Engrs, 1957, vol. 23, No. 136.
3. Lienhard J. H., Schrock V. E. The effect of pressure, geometry and the equation of state upon the peak and minimum boiling heat flux. Trans. ASME, Ser. C85, (J. Heat Transfer), 1963, No. 3.
4. Rallis C. I., Jawurek H. H. Latent heat transport in saturated nucleate boiling. Intern. J., Heat Mass Transfer, 1964, vol. 7, No. 10.
5. Деев В. И., Гусев В. В., Дубровский Г. П. Исследование механизма кипения воды при пониженных давлениях. Теплоэнергетика, 1965, № 8.
6. Bernath L. A theory of local-boiling burnout and its application to existing data. Chem. Engng Progr. Sympos. Series, 1960, vol. 56, No. 30.
7. Бобровиц Г. И., Гогонин И. И., Кутателадзе С. С. Влияние размера поверхности нагрева на критический тепловой поток при кипении в большом объеме жидкости. ПМТФ, 1964, № 4.
8. Cole R. A photographic study of pool boiling in the region of the critical heat flux. Amer. Inst. Chem. Engng. J., 1960, vol. 6, No. 4.
9. Деев В. И., Соловьев А. Н. О механизме кипения жидкого натрия на поверхности нагрева при свободной конвекции. Инж.-физ. ж., 1964, № 6.
10. Clark H. B., Strange P. S., Westwater I. W. Active sites for nucleate boiling. Chem. Engng. Progr. Sympos. Series, 1959, vol. 55, No. 29.
11. Griffith P., Wallis J. D. The role of surface conditions in nucleate boiling. Chem. Engng. Progr. Sympos. Series, 1960, vol. 56, No. 30.