

УДК 536.423

**ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА КИПЕНИЯ ФРЕОНА-12
В ШИРОКОМ ИНТЕРВАЛЕ ДАВЛЕНИЙ**

Г. П. Николаев, Е. Н. Макаров

Обсуждаются данные по кризису кипения фреона-12 на горизонтальной платиновой проволоке диаметром 47 мк и длиной 25,7 мм в условиях естественной конвекции при приведенных давлениях $p/p_{кр} = 0,16 \div 0,98$. Средняя температура поверхности, соответствующая максимальной тепловой нагрузке, для значений $p/p_{кр} > 0,4$ превышает температуру достижимого перегрева, а при $p/p_{кр} > 0,75$ – критическую. Приводятся формулы для расчета максимальной тепловой нагрузки и соответствующего температурного напора.

По вопросу исследования теплоотдачи при кипении фреонов имеется ряд работ [1–3] *. Однако большинство исследований проведено в узком интервале давлений. Теплоотдача и кризис кипения в широком интервале давлений, включая и критическую область, изучены, на наш взгляд, недостаточно полно [4].

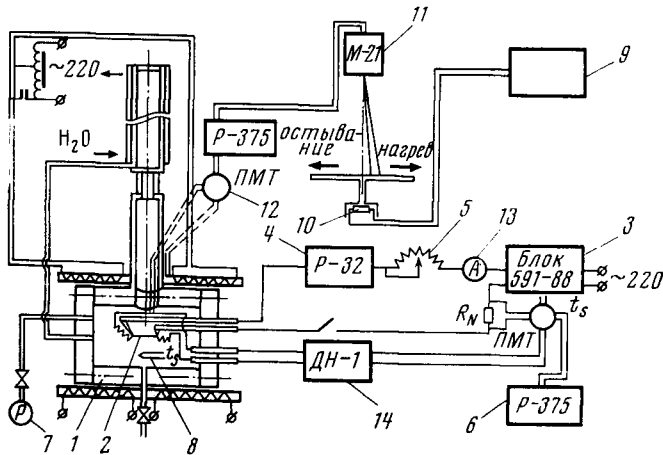


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 – камера высокого давления; 2 – платиновая проволока; 3 – стабилизированный блок питания 591–88; 4 – магазин сопротивлений Р-32; 5 – реохорд; 6 – высокоомный лабораторный потенциометр Р-375; 7 – образцовый манометр; 8 – медьконстантановая термопара; 9 – блок термостабилизации; 10 – фотосопротивление ФСК-1; 11 – зеркальный гальванометр М-21; 12 – переключатель термометрический многоточечный ПМТ; 13 – многопредельный амперметр М-104; 14 – делитель напряжения ДН-1

Нами проведено исследование критических тепловых потоков при кипении фреона-12 в условиях свободной конвекции в диапазоне давлений $p/p_{кр} = 0,16 \div 0,98$. В качестве нагревателя использовалась горизонтальная платиновая проволока диаметром 47 мк и длиной 25,7 мм, обогреваемая током. Опыты проводились в камере высокого давления рабочим объе-

* См. также докт. дис. Г. П. Даниловой ЛТИХП, 1968 г.

мом $\sim 700 \text{ см}^3$ 1, снабженной окнами для наблюдений [5] (рис. 1). Платиновая проволока 2 конденсаторным разрядом приваривалась к упругим пружинкам, вставленным в массивные токоподводы. Токоподводы и потенциальные зажимы уплотнялись во фланце и помещались внутри горизонтально расположенной цилиндрической камеры в паровую фазу. Концы платиновой нити соединялись с потенциальными зажимами тонкой манганиновой проволокой диаметром 0,05 мм [6]. Электрическая цепь питалась от низковольтного стабилизированного блока питания 591-88 3 постоянного тока напряжением 6 в. Точность определения плотности теплового потока составляла 10%. Температура нити регулировалась магазином сопротивлений Р-32, 4 и реохордом 5. Платиновая проволока предварительно отжигалась, промывалась и градуировалась как термометр со-

данным. Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи τ для различных давлений p и температур t_w поверхности проволоки t_w приведена на рис. 3. Температурная зависимость коэффициента теплоотдачи τ для различных давлений p и температур t_w поверхности проволоки t_w приведена на рис. 3.

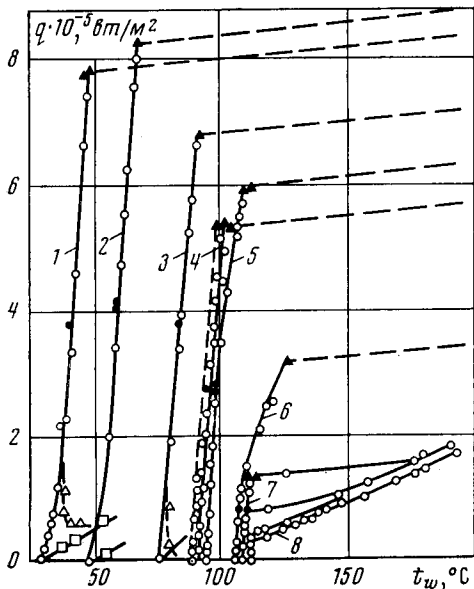


Рис. 2

Рис. 2. Зависимость плотности теплового потока от температуры поверхности:

1 — $p/p_{кр} = 0,16$; 2 — 0,28; 3 — 0,49; 4 — 0,65; 5 — 0,71; 6 — 0,89; 7 — 0,94; 8 — 0,98

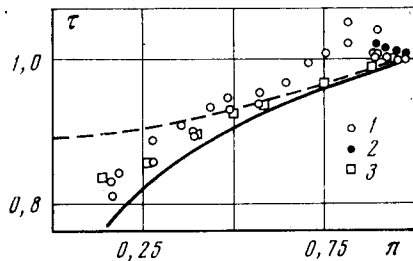


Рис. 3

Рис. 3. Изменение приведенных температур от давления:

1 — $\tau_{\max} = T_{\max}/T_{кр}$, кипение фреона-12 на платиновой проволоке диаметром 47 мк; 2 — $\tau_{\max} = T_{\max}/T_{кр}$, кипение углекислоты на платиновой проволоке диаметром 29,2 мк (дис. Г. П. Николаева); 3 — $\tau_{\max} = T_{\max}/T_{кр}$, кипение *n*-пентана на горизонтальной трубке диаметром 3,8 мм ([5] и дис. Г. П. Николаева); пунктирная кривая — $\tau_{кр} = T_{кр}/T_{кр}$, линия температур достижимого перегрева; сплошная кривая — $\tau_s = T_s/T_{кр}$, кривая насыщения

противления с точностью $\pm 0,3^\circ \text{C}$. Сопротивление проволоки измерялось с помощью потенциометра Р-375, 6. В опытах давление насыщения поддерживалось постоянным и определялось образцовым манометром 7 класса 0,2. Температура насыщения внутри камеры контролировалась медь-константановой термпарой 8 диаметром 0,1 мм. Схема термостабилизации 9 обеспечивала точность поддержания температуры $\pm 0,05^\circ \text{C}$.

Исследуемое вещество напускалось в предварительно откачанный объем камеры через систему фильтров. По появлению и исчезновению мениска определялись критические давление $p_{кр}$ и температура $t_{кр}$ фреона-12: $p_{кр} = (41,6 \pm 0,2) \text{ бар}$, $t_{кр} = (111,4 \pm 0,3)^\circ \text{C}$.

На рис. 2 представлены некоторые зависимости плотности теплового потока q от средней температуры поверхности проволоки t_w для различных давлений. Кривые кипения в области развитого пузырькового кипения имеют плавный характер изменения вплоть до значений максимальных (первых критических) тепловых потоков q_{\max} и температур t_{\max} (на графике этим значениям соответствуют темные треугольники). При низких давлениях переход от пузырькового режима кипения к пленочному сопровождается резким возрастанием температуры поверхности нити. По этой причине области устойчивого пленочного и переходного кипения исследо-

ван только при приведенных давлениях больших 0,9. Наблюдается своеобразный гистерезис кривой кипения: тепловой поток в переходной области неоднозначно определяется температурой поверхности. Верхние ветви кривых 7 и 8 при переходном режиме кипения соответствуют увеличению тепловой нагрузки, нижние — ее уменьшению. При прекращении смешанного кипения в случае снижения температуры нити точки, обозначенные темными кружками, укладываются на ветвь пузырькового кипения. Кривизна кривых меняет знак в области давлений $p/p_{кр} \geq 0,6$. Начальный участок кривой $q=f(t_w)$ реализуется только при уменьшении тепловой нагрузки (обратный ход) для интервала давлений $p/p_{кр}$ от 0 до 0,5. С увеличением тепловой нагрузки от нуля точки, обозначенные прямоугольниками, ложатся правее линии обратного хода. Кипение на нити отсутствует. Наблюдается характерное сложное движение жидкости над нитью, конвективные токи в объеме незначительны. Небольшое увеличение нагрузки q приводит к вскипанию жидкости и появлению шлейфа из мелких пузырьков на коротком участке проволоки. Затем пузырьковое кипение распространяется на всю длину нагревателя, температура поверхности уменьшается, а тепловой поток растет (участок кривой обозначен треугольниками). Для приведенного давления $p/p_{кр}=0,16$ перегрев жидкости достигал значений 20—25° С. Перегрев диэтилового эфира, *n*-пентана и бензола на тонких проволоках наблюдался в [7]. С ростом давления ($p/p_{кр} > 0,5$) перегрев жидкости исчезает и кривые пузырькового кипения совпадают при увеличении и уменьшении нагрузки.

На рис. 3 в относительных координатах $\tau=T/T_{кр}$ и $\pi=p/p_{кр}$ приведены опытные данные по максимальным температурам, соответствующим максимальному тепловому потоку $q_{макс}$, рассчитанные значения температур достижимого перегрева $T_{п}/T_{кр}$ фреона-12 и кривая насыщения $T_s/T_{кр}$. Экспериментальные значения $\tau_{макс}=T_{макс}/T_{кр}$ для фреона-12 как и для углекислоты при тех же условиях кипения* в интервале $0,42 < p/p_{кр} < 0,93$ лежат выше линии достижимого перегрева в отличие от результатов по кипению *n*-пентана на горизонтальной трубке при внутреннем обогреве теплоносителем ([5] и дис. Г. П. Николаева) и углекислоты на платиновой проволоке [8], где значения $T_{макс}$ и $T_{п}$ близки. В области $p/p_{кр} > 0,75$ значения максимальных температур больше критической температуры. Качественно этому факту можно дать следующее объяснение. В эксперименте на тонких проволоках с большим отношением длины к диаметру измеряется средняя температура греющей поверхности. Развитое пузырьковое кипение приводит к изоляции значительной части поверхности паровыми пузырьками, где локальная температура может превысить температуру достижимого перегрева $t_{п}$ и даже критическую $t_{кр}$. Явление пристеночного перегрева, как отмечено выше, при высоких давлениях не обнаружено. В этом случае число действующих центров парообразования увеличивается по сравнению с кипением при низких давлениях, растет и доля поверхности, занятая паром.

Как показала оценка в случае $p/p_{кр} \approx 0,8$, достаточно изоляции 0,1 поверхности нагревателя паровыми пузырями, чтобы средняя температура поверхности превысила критическую $t_{кр}$. Локальные значения температур в местах периодического контакта жидкой фазы с теплоотдающей поверхностью при пузырьковом кипении вплоть до кризиса на цилиндрических поверхностях большего диаметра и меньших отношений длины к диаметру (см. дис. Г. П. Николаева) не превышают температуры достижимого перегрева, как и предполагалось в [9]. Используя представления о механизме теплообмена при пузырьковом кипении в условиях свободной конвекции [10] и соотношение

$$Nu=C Pr^n Re^m, \quad (1)$$

* См. канд. дис. Г. П. Николаева. Уральский политехн. институт, Свердловск, 1966 г.

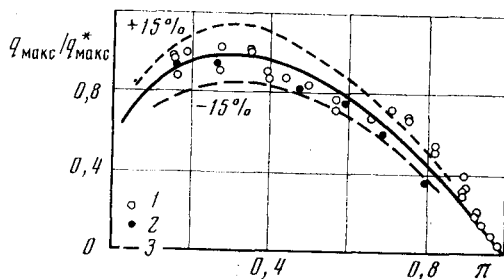
рассчитаны максимальные температурные напоры, соответствующие кризису кипения

$$\Delta t_{\max} = \frac{q_{\max}}{C Pr^n Re^m \lambda} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho' - \rho'')}} \quad (2)$$

где $\Delta t_{\max} = t_{\max} - t_s$; q_{\max} — опытное значение максимального теплового потока; σ — поверхностное натяжение; ρ' , ρ'' — плотности жидкости и пара; λ — теплопроводность жидкости. Для значений $C=0,95$, $n=0,33$ и $m=0,65$ расчетные величины по уравнению (2) в пределах $\pm 20\%$ совпали с опытными данными.

Рис. 4. Зависимость приведенных максимальных тепловых потоков от приведенного давления:

1 — максимальные тепловые потоки при кипении фреона-12 на платиновой проволоке, обогрев током; 2 — кипение *n*-пентана на горизонтальной трубке, обогрев теплоносителем ([5] и дис. Г. П. Николаева); 3 — по уравнению (3) ([11] и дис. Г. П. Николаева)



Зависимость максимального теплового потока от давления при кипении фреона-12 на тонких цилиндрических нагревателях с точностью $\pm 15\%$ (рис. 4) описывается уравнением [11] (см. также дис. Г. П. Николаева)

$$q_{\max}/q_{\max}^* = 2,1 (p/p_{кр})^{0,35} (1 - p/p_{кр})^{0,9} \quad (3)$$

где q_{\max}^* — значение максимальной тепловой нагрузки при давлении $p = 0,31 p_{кр}$. Формула (3) обобщает данные, полученные для любых комбинаций поверхность — жидкость.

Уральский политехнический институт им. С. М. Кирова

Поступила в редакцию
8 II 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Волошко. Холодильная техника, № 8, 31, 1971.
2. Г. В. Рагиани, Д. И. Авелиани. Холодильная техника, № 1, 40, 1963.
3. И. И. Гогонин. Холодильная техника, № 3, 24, 1970.
4. С. П. Бесчастнов, П. Л. Кириллов, В. П. Петров. Сб. Тепло- и массоперенос, 2, ч. 1, Минск, 25, 1972.
5. Г. П. Николаев, В. П. Скрипов, Е. Н. Будин. Тр. ЦКТИ, вып. 62, 137, 1965.
6. Г. П. Николаев, О. В. Медведев, Н. И. Бармин. Сб. Атомная и молекулярная физика. Труды УПИ, Свердловск, № 189, 59, 1971.
7. В. П. Скрипов, Н. В. Буланов. Инж.-физ., 22, № 4, 614, 1972.
8. В. П. Скрипов, Э. Н. Дубровина. Инж.-физ. ж., 20, № 4, 725, 1971.
9. В. П. Скрипов. Труды УПИ, Свердловск, № 123, 50, 1962.
10. С. С. Кутателадзе. Основы теории теплообмена. «Наука», 1970.
11. Г. П. Николаев, В. П. Скрипов. Инж.-физ. ж., 15, № 1, 46, 1968.