

КРИТИЧЕСКИЕ ТЕПЛОВЫЕ ПОТОКИ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОГО АЗОТА, НЕДОГРЕТОГО ДО ТЕМПЕРАТУРЫ НАСЫЩЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ВЫНУЖДЕННОГО ДВИЖЕНИЯ

С. И. Верхман

(Омск)

Приводятся экспериментальные данные по определению критических тепловых потоков при кипении жидкого азота в условиях вынужденного течения в интервале весовых скоростей от $2 \cdot 10^3$ до $40 \cdot 10^3$ кг/м² сек, давлений от $29 \cdot 10^4$ до $245 \cdot 10^4$ н/м² и при недогревах, соответствующих условиям возникновения нормальных кризисов кипения.

Обозначения: q_0 — критический тепловой поток; r — теплота парообразования; i' — энтальпия потока, соответствующая температуре насыщения; i — энтальпия потока, соответствующая температуре жидкости; σ — поверхностное натяжение; γ' — плотность жидкости; γ'' — плотность насыщенного пара; C_f — коэффициент трения; W_g — весовая скорость; $F_{rж}$ — критерий Фруда; g — ускорение свободного падения. Известны теоретические формулы для двух предельных случаев кипения жидкости, нагретой до температуры насыщения ([1], гл. 8).

$$\frac{q_0}{r \sqrt{\gamma''} [g^2 \sigma (\gamma' - \gamma'')]^{1/4}} = K \approx 0.14 \quad \text{при } W_g \rightarrow 0 \quad (1)$$

$$\frac{q_0}{r W_g \sqrt{\gamma'' / \gamma'}} = K_1 \approx 0.34 C_f \quad \text{при } W_g \rightarrow \infty \quad (2)$$

В работах [2-4] опыты по определению критических тепловых потоков при кипении недогретого до температуры насыщения этилового спирта, движущегося с большими скоростями, удалось описать линейной интерполяционной формулой вида

$$q_0 = \left[1 + \frac{i' - i}{r} \left(\frac{\gamma'}{\gamma''} \right)^{1/2} \right] \left\{ 0.34 C_f r W_g \left(\frac{\gamma''}{\gamma'} \right)^{1/2} + 0.14 r \sqrt{\gamma''} [g^2 \sigma (\gamma' - \gamma'')]^{1/4} \right\} \quad (3)$$

в интервале изменения приведенного недогрева ϑ

$$0 < \vartheta < 2, \quad \vartheta = \frac{i' - i}{r} \left(\frac{\gamma'}{\gamma''} \right)^{1/2} \quad (4)$$

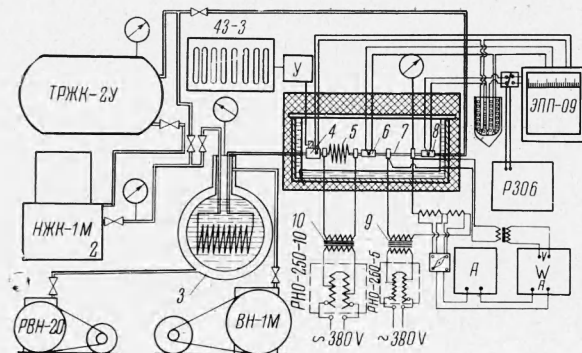
Коэффициент гидравлического сопротивления в формуле (3) рассчитывался как для случая изотермического течения однофазного потока в гладких трубах [4].

Задачей исследования было экспериментальное изучение зависимости критических тепловых потоков от давления, величины недогрева жидкости до температуры насыщения, весовой скорости, а также изучение влияния диаметра трубопровода на величину q_0 .

Опыты проведены на технически чистом азоте с концентрацией 99.9%.

Была создана экспериментальная установка, специально сконструированная для работы с жидким азотом, недогретым до температуры насыщения. Принципиальная схема установки приведена на фиг. 1.

Циркуляционный контур был изготовлен из тонкостенных труб нержавеющей стали 1X18Н10 с вакуумно-слоистой изоляцией. Принудительное движение жидкости осуществ-



Фиг. 1

лялось насосом жидкого азота типа НЖК-1М, с рабочим давлением 220 атм.

Жидкий азот из танка 1 под давлением 1.5 атм поступал в циркуляционный насос 2, из которого под высоким давлением через регулировочный вентиль подавался в преохладитель жидкости 3, проходил через тахометрический расходомер 4 и поступал в

вспомогательный нагреватель 5, в котором подогревался до заданной температуры. Далее жидкость проходила через экспериментальный участок 7 и возвращалась в танк.

Опыты проводились на экспериментальных трубках с внутренним диаметром 4,4, 2,68, 1,13 мм, длиной 60—100 мм. Длина участка гидродинамической стабилизации равнялась длине обогреваемого участка.

Мощность, подводимая к экспериментальному участку, измерялась ваттметром класса точности 0,2. Ваттметр присоединялся к измерительным трансформаторам тока и напряжения того же класса точности. Температура жидкости измерялась за экспериментальным участком медь-константановой термопарой, установленной в смесителе, э. д. с. термопары определялась автоматическим потенциометром ЭПП-09, протарированным по образцовому потенциометру Р-306.

Критические тепловые потоки достигались путем плавного увеличения тепловой нагрузки на экспериментальном участке. Кризис определялся по резкому уменьшению тока в электрической цепи экспериментального участка, фиксируемого амперметром типа ЭЛА класса точности 0,2.

Опыты проводились отдельными сериями в интервалах изменения давления p от $29 \cdot 10^4$ до $245 \cdot 10^4$ н/м², весовых скоростей W_g от $2 \cdot 10^3$ до $41 \cdot 10^3$ кг/м² сек, при переменных недогревах, соответствующих значениям приведенного недогрева жидкости в диапазоне (3); диаметр трубопровода 1 ÷ 4 мм.

Согласно, (4), указанные недогревы жидкости соответствуют условиям возникновения нормальных кризисов кипения.

Для выявления влияния скорости на процесс кризиса кипения в исследуемом интервале изменения скоростей опытные данные обрабатывались в виде зависимости

$$q_* = q_*(Fr_*), \quad q_* = \frac{q_0}{rW_g} \left(\frac{\gamma''}{\gamma'} \right)^{1/2}, \quad Fr_* = \frac{W_g}{\sqrt{\gamma' [g^2 \sigma (\gamma' - \gamma'')]^{1/4}}}$$

На фиг. 2 приведена зависимость величины приведенного теплового потока от критерия Фруда: кривые 1, 2, 3, 4 соответствуют значениям приведенного недогрева 1,4; 1,0, 0,6, 0,25.

Анализ полученной зависимости дает возможность отметить факт существования двух областей, в которых влияние недогрева на величину q_0 различно.

Кривая в области значений числа Фруда $Fr_* \cdot 10^{-2} > 200$ асимптотически приближается к горизонтальной прямой линии, соответствующей значениям q_0 , рассчитанным по формуле (2). В этом интервале изменения скоростей ($W_g > 8 \cdot 10^3$ кг/м² сек) наблюдается постоянная существенная зависимость q_0 от недогрева жидкости. Линии постоянных недогревов располагаются эквидистантно одна относительно другой.

Область меньших скоростей течения ($67 < Fr_* \cdot 10^{-2} < 200$) характеризуется переменной зависимостью q_0 от недогрева, которая существенно ослабевает с уменьшением скорости, а при достижении скоростей $W_g < 2 \cdot 10^3$ кг/м² сек ($Fr_* \cdot 10^{-2} < 67$) линии постоянных недогревов, как видно из графика, сливаются в одну прямую, что указывает на отсутствие влияния недогрева на величину q_0 в этой области.

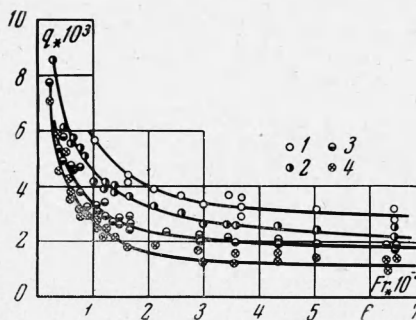
Экспериментальные данные по кризису кипения при тчении жидкого азота с большими скоростями сравнивались с расчетами по формуле (3). На фиг. 3 приведены данные по кризису кипения жидкого азота в виде зависимости приведенного теплового потока

$$K_* = q_0 / 0,14r \sqrt{\gamma'' [g^2 \sigma (\gamma' - \gamma'')]^{1/4}} + 0,34C_f r W_g \sqrt{\frac{\gamma''}{\gamma'}}$$

от величины недогрева

$$\Phi = \frac{\Delta i}{r} \left(\frac{\gamma'}{\gamma''} \right)$$

Эксперименты проводились с трубкой диаметром — 2,68 мм при скорости $W_g = 8 \cdot 10^3$ кг/м² сек: точки 1 соответствуют давлению $p = (118 \div 147) \cdot 10^4$ н/м², точки 2 для $p = 29 \cdot 10^4$, точки 3 для $p = (216 \div 145) \cdot 10^4$ н/м². Эксперименты с трубкой диаметром 1,13 мм: при скоростях от $8 \cdot 10^3$ до $22 \cdot 10^3$ кг/м² сек; при скорости

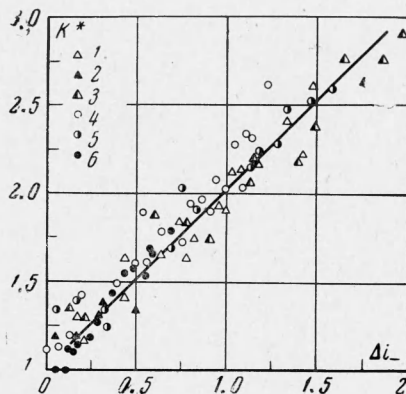


Фиг. 2

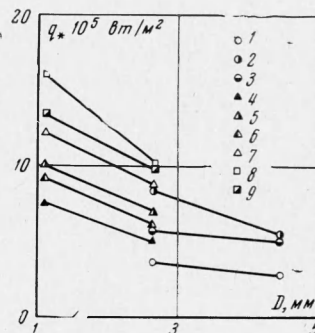
от $8 \cdot 10^3$ до $41 \cdot 10^3$ кг/м²сек. Точка 4 для $p = (118 \div 145) \cdot 10^4$ н/м², точка 5 для $p = 216 \cdot 10^4$ н/м², наконец, точка 6 для $p = 49 \cdot 10^4$ н/м².

Анализ полученной зависимости дает возможность отметить удовлетворительную согласованность опыта с расчетами по формуле (3) в интервале изменения приведенного недогрева $0.25 < \vartheta < 2$. Следует отметить большой разброс экспериментальных точек в интервале $0 < \vartheta < 0.25$.

В работе В. И. Адамовского и Л. С. Штоколова [4] была выяснена роль коэффициента гидравлического сопротивления в формуле для расчета q_0 , который рассчитывался по формуле для случая изотермического течения жидкости в гладких трубах, что по их мнению справедливо в интервале $0.2 < \vartheta < 2$. Эксперименты указывают, что



Фиг. 3



Фиг. 4

в интервале $0 > \vartheta < 0.25$ коэффициент гидравлического сопротивления находится в обратной зависимости от недогрева. На фиг. 4 приводятся результаты сопоставления значений q_0 , полученных на трубках разных диаметров при прочих равных условиях; три числа у каждой из точек 1, ..., 9 означают последовательно (относительный недогрев $\Delta i/r$, давление p в 10^{-4} н/м², скорость Wg 10^{-3} кг/м² сек): 1 (0.15, 240, 4.0), 2 (0.85, 50, 4.0), 3 (0.12, 240, 4.0), 4 (0.023, 50, 8.0), 5 (0.083, 50, 8.0), 6 (0.125, 157, 9.5), 7 (0.12, 50, 8.0), 8 (0.22, 127, 8.0), 9 (0.175, 127, 8.0).

Как видно из графика, величина q_0 увеличивается с уменьшением диаметра, особенно значительно при переходе от 2.68 к 1.13 мм.

Однако, как видно из фиг. 3, значения q_0 , полученные на трубках разных диаметров, удовлетворительно обобщаются уравнением (3). Это по-видимому, связано с тем, что влияние диаметра учитывается при расчете коэффициента гидравлического сопротивления.

Таким образом, полученные опытные данные по критическим тепловым потокам при кипении жидкого азота подтверждают возможность использования формулы (3) для вычисления q_0 в интервале изменения скоростей от $41 \cdot 10^3$ до $8 \cdot 10^3$ кг/м² сек и приведенного недогрева от 0.25 до 2. При расчете величины q_0 в области скоростей $Wg < 8 \cdot 10^3$ кг/м²сек переменную зависимость q_0 от недогрева можно учесть введением в формулу (3) эмпирического коэффициента при комплексе ϑ (по опытным данным, в интервале измерения скорости $2 \cdot 10^3 < w_g < 8 \cdot 10^3$ кг/м² сек величина этого коэффициента равна 0.5).

Поступила 12 III 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. Тепломассообмен и трение в турбулентном пограничном слое. Кн. 1, под ред. С. С. Кутателадзе, СО АН СССР, Новосибирск, 1964.
2. Штоколов Л. С. Опыт обобщения данных о критических тепловых потоках при кипении жидкостей в области больших скоростей течения. ПМТФ, 1964, № 1.
3. Штоколов Л. С. Обобщение экспериментальных данных о распространенном кризисе теплообмена при кипении жидкостей. ПМТФ, 1966, № 1.
4. Адамовский В. И., Кутателадзе С. С., Штоколов Л. С. Гидравлическое сопротивление при кипении этилового спирта, недогретого до температуры насыщения, в области больших скоростей течения. ПМТФ, 1967, № 3.