

## ЛИТЕРАТУРА

1. Arden E. A., Powling J., Smith W. A. W. Observation on the Burning of Ammonium Perchlorate. Combustion and Flame, 1962, vol. 6, No. 1, 21.
2. Jacobs P. W. M., Kureishy A. R. T. The Effect of Additives on the Thermal Decomposition of Ammonium Perchlorate, 8-th Symposium (International) on Combustion, p. 672.

### ОПЫТ ОБОБЩЕНИЯ ДАННЫХ О КРИТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКАХ ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТЕЙ В ОБЛАСТИ БОЛЬШИХ СКОРОСТЕЙ ТЕЧЕНИЯ

Л. С. Штоколов

(Новосибирск)

На основе предельных соотношений гидродинамической теории кризисов теплообмена при кипении обобщаются экспериментальные данные для нескольких жидкостей при течении с большими скоростями и ядре потока, недогретом до температуры насыщения.

Немногочисленные исследования критических тепловых потоков при больших скоростях течения жидкости проведены главным образом с водой, см., например, [1-5].

Опубликованные опыты с этиловым и метиловым спиртом [6, 7] проведены при больших недогревах ядра потока до температуры насыщения. В этих условиях при кипении органических жидкостей возможен так называемый «распространенный кризис», без интенсивного скачка температуры и с относительно равномерным разогревом всей поверхности теплообмена одновременно.

В связи с отличием такого процесса от нормального кризиса теплообмена при кипении основная часть опытов, приведенных в работах [6, 7], не может быть пока использована для обобщения. Ниже приводятся результаты некоторых специально проведенных опытов, а также сравнение их с данными других авторов и выводами гидродинамической теории кризисов теплообмена при кипении.

#### Обозначения

$p$ — статическое давление в сечении начала кризиса,	$\gamma''$ — удельный вес сухого насыщенного пара,
$p_*$ — критическое давление,	$\sigma$ — коэффициент поверхностного натяжения,
$\pi$ — приведенное давление,	$\mu$ — средняя динамическая вязкость жидкости в ядре потока в сечении начала кризиса,
$\Delta i$ — энтальпия недогрева,	$\mu'$ — динамическая вязкость жидкости на линии насыщения;
$r$ — весовая теплота испарения,	$g$ — ускорение земного притяжения,
$x$ — относительная энтальпия недогрева,	$q_*$ — критическая удельная плотность теплового потока,
$w$ — средняя линейная скорость в ядре потока жидкости в сечении начала кризиса,	$q_{*0}$ — тоже на линии насыщения.
$\gamma$ — средний удельный вес жидкости в сечении начала кризиса,	
$\gamma'$ — удельный вес жидкости на линии насыщения,	

Опыты проводились с 96%-ным раствором этилового спирта в вертикальных трубах. Приведенные давления  $\pi = p / p_*$  изменялись от 0.0715 до 0.858, относительная энтальпия недогрева  $x = \Delta i / r$  — от 0 до -2, средняя скорость ядра потока  $w$  — от 6 до 60 м/сек.

Опыты проводились на трубках из нержавеющей стали IX18H9T с внутренним диаметром 2 или 4 мм, длиной обогреваемой части соответственно 30 и 60 мм и толщиной стенки 1 мм.

При сравнении экспериментальных данных, полученных на трубках диаметром 2 и 4 мм, при одинаковых прочих условиях, влияние диаметра на  $q_*$  не обнаружено.

Кризис кипения достигался медленным увеличением электрической нагрузки на экспериментальном участке и при обычном кризисном процессе всегда начинался непосредственно около выхода из обогреваемой трубки

В большинстве случаев фиксирование кризиса производилось по отклонению стрелки гальванометра, включенного в диагональ моста, плечами которого служили две части реостата и две части экспериментальной трубки.

Для контроля и более точного определения места начала кризиса во время опытов одновременно использовались два или три моста с отдельными гальванометрами и производилось визуальное наблюдение за покраснением трубки.

Специальными наблюдениями было установлено, что при медленном увеличении тепловой нагрузки на экспериментальном участке с помощью приборов кризис фиксировался раньше, чем начиналось покраснение экспериментальной трубки. Если после отклонения стрелки гальванометра прекращалось увеличение нагрузки, то через некоторый промежуток времени всегда происходило покраснение обогреваемого участка.

Исходя из гидродинамической теории кризисов кипения [8] и некоторых дополнительных соображений были получены предельные соотношения для критических тепловых потоков в случае, когда скорость ядра потока жидкости  $w \rightarrow \infty$

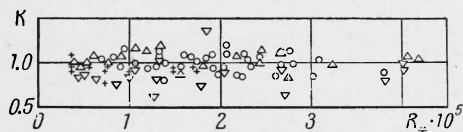
$$q_* / q_{*0} \approx 1 - Ax \sqrt{\gamma / \gamma''} \\ (q_{*0} = Brw \sqrt{\gamma \gamma''}; A, B = \text{const}) \quad (1)$$

Опыты, проведенные с этиловым спиртом при скоростях от 6 до 60 м/сек, показали, что в области умеренных скоростей величина  $B$  не является константой, а слабо зависит от скорости и давления.

Путем использования соотношений (1) и обработки полученных экспериментальных данных построена следующая зависимость для кризиса кипения при больших, но конечных скоростях течения жидкости

$$\frac{q_*}{\{0.0013rw(\gamma\gamma'')^{0.5} + 0.14r(g\gamma'')^{0.5}[\sigma(\gamma' - \gamma'')^{0.25}][1 - x(\gamma/\gamma'')^{0.5}]\}} = K \approx 1 \quad (2)$$

С этой формулой были сопоставлены также экспериментальные данные, полученные другими авторами для воды и аммиака при больших скоростях течения [1-5,9].

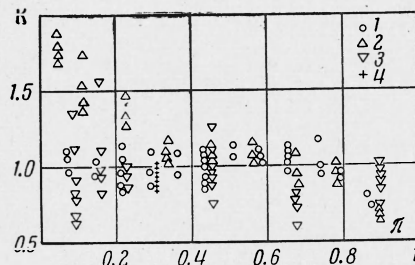


Фиг. 2. Зависимость  $\bar{K} = \bar{K}_{**}$  от  $R$ , точки, как на фиг. 1, обозначают: 1 — этиловый спирт, данные автора, давление от 5 до 60 бар; 2 — вода, [1-3], давление от 73.5 до 166.5 бар; 3 — вода, [4, 5], давление от 19.5 до 196 бар; 4 — аммиак, [9], давление 34 бар

В работах [1,2] отсутствовала зависимость  $q_*$  от недогрева при незначительных недогревах. Поэтому экспериментальные данные из этих работ брались только для опытов, в которых недогрев был больше 45° К.

Из работ [4,5] были использованы экспериментальные точки, связанные между собой в отдельные группы с постоянной скоростью, для которых авторами были указаны точные значения давлений.

Отклонение отдельных точек, полученных в работе [1] при давлениях до 73.5 бар, вверх от горизонтальной линии, вероятно, объясняется тем, что в этих опытах кризис определялся по покраснению или перегоранию трубки. Как было установлено при таком способе проведения эксперимента часто фиксируются завышенные значения  $q_*$ .



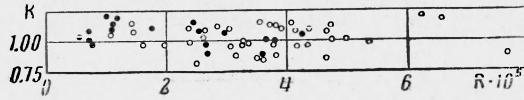
Фиг. 1. Зависимость  $K = K_{**}$  от  $\pi$ ; весовая скорость  $W$  в  $10^3$  м<sup>2</sup>/сек; точки дают: 1 — этиловый спирт, данные автора,  $W$  от 52 до 335; 2 — вода, данные [1-3],  $W$  от 51 до 306; 3 — вода, данные [4, 5],  $W$  от 51 до 414; 4 — аммиак, данные [9],  $W$  от 51 до 268

На фиг. 1 показана зависимость осредненных значений комплекса  $K_{**}$  от приведенного давления  $\pi$ . Значения ординат были получены путем подстановки экспериментальных данных в левую часть уравнения (2) с последующим осреднением путем вычисления средней арифметической величины  $K_{**}$  для каждой серии опытов, проведенных при постоянных давлениях и скоростях.

Значения величин  $\gamma$ ,  $\gamma'$ ,  $\gamma''$  и  $r$  для этилового спирта взяты из [10]. Энтальпия этилового спирта определялась по данным [11]. Термодинамические параметры для воды и аммиака брались из [11-13].

Отклонение точек вниз от горизонтальной линии при давлениях близких к критическому, по-видимому, объясняется вырождением обычного кризиса кипения при высоких давлениях и скоростях течения жидкости [3].

В ряде работ в качестве безразмерной скорости при обобщении экспериментальных данных по кризисам кипения при вынужденном движении жидкости используются критерии Рейнольдса вида



Фиг. 3. Зависимость  $K$  от  $R$ ; светлые точки — этиловый спирт, данные автора, давление от 5 до 60 бар; темные точки — вода, данные [1-3], давление от 73.5 до 166.5 бар

$$\alpha \tau_* = \frac{w\gamma'}{g\mu} \delta \quad \left( \delta = \sqrt{\frac{\sigma}{\gamma' - \gamma''}} \right)$$

где за линейный размер принята капиллярная постоянная  $\delta$  или

$$R = \frac{w\gamma}{g\mu} d$$

где за линейный размер принят диаметр трубы или эквивалентный диаметр канала.

На фиг. 2 и 3 представлены зависимости  $K_{**}$  от  $\bar{R}_*$  и  $R$ . Координатами точек являются средние арифметические значения этих величин, вычисленных для каждой серии экспериментов в отдельности.

Отчетливо видно, что за исключением области околокритических давлений комплекс  $K_{**}$  не зависит ни от приведенного давления, ни от числа  $R$ .

Таким образом, формула (3), структура которой была получена, исходя из предельных соотношений, основанных на гидродинамической теории кризисов, а поправка на конечные значения скорости из результатов опытов со спиртом удовлетворительно описывает также и опытные данные по критическим тепловым нагрузкам, проведенным на воде и аммиаке при больших скоростях течения жидкости.

Поступила 8 VIII 1963

#### ЛИТЕРАТУРА

- О р н а т с к и й А. П. и К и ч и г и н А. М. Исследование зависимости критической тепловой нагрузки от весовой скорости, недогрева и давления. Теплоэнергетика, 1961, № 2.
- О р н а т с к и й А. П. и 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.
- О р н а т с к и й А. П. Критические тепловые нагрузки и теплоотдача при вынужденном движении воды в трубах в области сверхвысоких давлений (170—220 атм). Теплоэнергетика, 1963, № 3.
- П о в а р н и н П. И. и С е м е н о в С. Т. Исследование кризиса кипения воды, недогретой до температуры насыщения при движении ее с большой скоростью в трубах. Теплоэнергетика, 1959, № 4.
- П о в а р н и н П. И. 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, 1960, № 1.
- П о в а р н и н П. И. Исследование кризиса кипения при течении 96%-ного этилового спирта в условиях недогрева. Теплоэнергетика, 1962, № 12.
- П о в а р н и н П. И. Исследование кризиса кипения при течении недогретого метилового спирта. ПМТФ, 1963, № 3.
- К у т а т е л а д з е С. С. Теплопередача при конденсации и кипении. Машгиз, 1952.
- V a r t z D. R. Factors Which Influence the Suitability of Liquid Propellants as Rocket Motor Regenerative Coolants. Jet Propulsion, 1958, vol. 28, No 1.
- В у к а л о в и ч М. П. и Д з а м п о в Б. В. Термодинамические свойства 96%-ного (по объему) раствора этиловый спирт — вода. Теплоэнергетика, 1960, № 2.
- К у т а т е л а д з е С. С. и Б о р и ш а н с к и й В. М. Справочник по теплопередаче. Госэнергоиздат, 1959.
- В а р г а ф т и к Н. Б. Теплофизические свойства веществ. Справочник, Госэнергоиздат, 1956.
- Холодильная техника, Энциклопедический справочник, книга 1, Госторгиздат, 1960.