

## ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА КИПЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ НЕДОГРЕТОГО МЕТИЛОВОГО СПИРТА

П. И. Поварнин

(Москва)

В настоящее время известно много работ по изучению кризиса кипения при вынужденном течении недогретой воды в широком диапазоне изменения давлений [1-3].

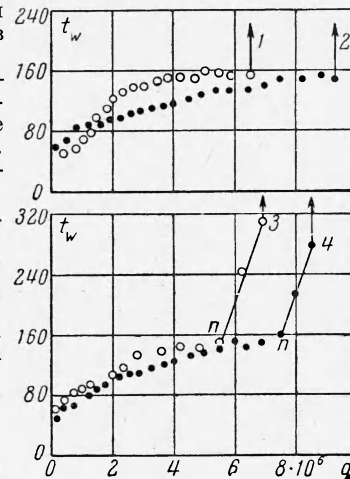
Использование в технике других теплоносителей, главным образом органических соединений, и расширение представлений о характере явления требуют новых исследований. В то же время таких работ очень мало. В частности, по спиртам известны статьи Л. С. Стермана, Н. Г. Стюшина [4], в которых описаны опыты по кризису для изопропилового и этилового спиртов. Причем эти опыты охватывают сравнительно узкий интервал изменения скорости течения от 0.2 до 7 м/сек при давлении в 2 атм и нулевом недогреве.

Ниже описаны исследования кризиса кипения при принудительном течении метилового спирта по ГОСТ № 6995-54 в трубах малого диаметра при давлениях от 5 до 70 атм, скорости жидкости до 45 м/сек и недогреве до температуры насыщения от 8 до 200° С.

**Описание эксперимента.** Экспериментальная установка представляла собой замкнутый контур с циркуляционным насосом, измерителем расхода, устройствами для поддержания давления, предварительного подогрева перед экспериментальным участком и охлаждения жидкости перед насосом, аналогично установке в наших опытах с водой [1].

Опыты проводились на точеных и цельнотянутых трубах из нержавеющей стали и бронзы внутренним диаметром от 2.0 до 3.5 мм, при толщине стенки 0.2—0.3 мм и длине трубки от 40 до 210 мм. Методика проведения эксперимента, измерения и вы-

Фиг. 1. График типовых экспериментальных зависимостей  $t_{ст} = f(q)$ : 1-й тип (вверху) — внезапный скачок температуры, сопровождающийся пережогом 1 или отключением 2; 2-й тип (внизу) — кризис осложняется нагарообразованием, в точке перегиба П наблюдается самопроизвольный рост  $t_{ст}$ , в результате которого происходит отключение 3 или пережог 4



числения опытных величин оставалась такой же, как и в опытах с водой. Возможная точность измерений оценивалась в следующих пределах [1]: определение теплового потока с точностью  $\pm 12\%$ , определение скорости течения  $\pm 5\%$ , определение температуры жидкости  $\pm 5^\circ\text{С}$ , определение температуры внутренней поверхности трубки в зависимости от величины теплового потока  $q$  от  $\pm 5$  до  $\pm 30^\circ\text{С}$ .

В отличие от опытов с водой явление кризиса кипения при протекании метилового спирта осложнялось фактом термического разложения рабочей жидкости с образованием слоя нагара на внутренней поверхности трубки. В соответствии с этим все опыты разбиты на две группы. Опыты первого типа протекали по известной схеме, характерной для воды, когда в процессе опыта тепловой поток  $q$  постепенно увеличивается при сохранении постоянства всех остальных параметров. При этом последовательно наблюдались стадии конвективного теплообмена, поверхностного кипения и кризиса с внезапным броском температуры и частым пережогом трубки (фиг. 1, верхний график).

Опыты второго типа. Пройдя стадии конвективного теплообмена и поверхностного кипения, на внутренней поверхности трубки начинал откладываться слой нагара, что вело к самопроизвольному росту температуры наружной поверхности стенки, измерявшейся термопарой. В этом случае удавалось фиксировать в течение некоторого времени температуру стенки в пересчете на внутреннюю поверхность, которая превышала температуру насыщения на несколько сот градусов (см. фиг. 1, нижний график). Вскрытие трубок показало, что слой нагара в некоторых случаях достигал толщины 50 мк. Необходимо отметить, что образование подобных отложений наблюдалось и у других исследователей при работе с органическими жидкостями, например у Бэйли

Таблица 1

## Опытные данные по метиловому спирту

$t, ^\circ\text{C}$	$G, \frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{сек}}$	$q_*, \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{час}}$	Металл	$\frac{l}{d}$	$t, ^\circ\text{C}$	$G, \frac{\text{кг}}{\text{м}^2\text{сек}}$	$q_*, \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2\text{час}}$	Металл	$\frac{l}{d}$
$P = 5 \text{ атм}, B = 0.0162, A = 0.96 \cdot 10^6, C = 0.217$					43	23880	9.0	БР	5.0
109	1592	$1.53 \cdot 10^6$	ЭЯ — 1Т	60	40	7960	5.55	»	»
85	3980	2.96	»	»	83	»	3.6	»	»
48	»	3.02	БР	5.0	45	3980	3.06	»	»
45	1592	1.9	»	3.28	119	1592	1.63	»	»
30	3960	4.3	»	3.28	$P = 50 \text{ атм}, B = 0.0128, A = 0.59 \cdot 10^6, C = 0.29$				
$P = 10 \text{ атм}, B = 0.0152, A = 1.15 \cdot 10^6, C = 0.184$					20	6368	17.4	ЭЯ — 1Т	10.0
60	1592	3.5	ЭЯ — 1Т	10	60	1592	2.2	БР	»
60	1592	3.9	»	10	120	796	1.2	»	»
65	2388	4.9	»	10	105	3980	2.1	»	»
65	2388	4.0	»	10	80	7960	6.3	»	»
50	3960	6.3	»	10	100	3980	2.0	»	»
50	3960	5.05	»	10	»	»	2.1	»	»
40	7960	7.5	»	10	»	1592	1.6	»	»
21	31840	16.0	»	10	»	»	1.66	»	»
55	»	5.75	»	16.7	48	15920	7.5	»	12.5
55	»	4.9	»	12.5	40	39800	19.0	»	»
55	7960	6.4	»	»	»	31840	9.2	»	»
50	1592	3.4	»	»	»	23880	7.6	»	»
60	2388	4.45	»	10	»	31840	13.0	»	»
115	1592	2.75	БР	10	20	5920	8.0	»	»
85	3960	4.3	»	10	50	7960	5.5	»	»
60	»	4.8	»	10	100	11940	7.5	ЭЯ — 1Т	65
60	7960	6.65	»	10	85	3980	3.52	»	64
40	31840	14.80	»	12.5	100	»	4.06	»	65
40	23880	13.80	»	»	135	1592	1.7	»	60
40	15920	8.0	»	»	158	3980	2.56	»	»
102	3980	3.85	»	10	185	15922	1.55	»	»
108	7960	4.3	»	10	125	7960	5.12	»	»
80	15920	5.45	»	22.5	178	»	3.72	»	»
80	23880	8.35	»	»	50	31840	14.9	БР	12.5
25	7960	9.3	»	»	45	23880	11.3	»	»
76	31840	9.2	»	»	»	15920	9.0	»	»
32	15920	11.0	»	»	120	31840	10.5	»	»
32	7960	5.8	»	»	180	39800	6.42	»	»
70	3980	3.05	ЭЯ — 1Т	64	185	15920	4.8	»	»
72	11940	6.70	»	»	38	31840	10.5	»	5.0
72	»	8.2	»	»	40	23880	9.15	»	»
68	3980	4.18	»	»	45	15920	7.0	»	»
78	1592	3.25	»	»	40	7960	5.05	»	»
82	2388	3.43	»	»	50	3980	4.25	»	»
110	1592	1.85	»	»	40	1592	2.6	»	3.28
120	»	1.94	»	12.5	$P = 70 \text{ атм}, B = 0.0123, A = 0.21 \cdot 10^6, C = 1.2$				
130	15920	2.84	»	»	40	15920	9.5	БР	12.5
38	23880	8.6	»	»	»	»	10.5	»	»
38	15920	5.65	»	»	65	23880	10.4	»	»
35	7960	4.40	БР	5.0	»	31840	14.0	»	»
48	3960	3.60	»	»	»	»	12.0	»	»
55	1592	3.76	»	»	50	»	16.1	»	»
$P = 30 \text{ атм}, B = 0.01365, A = 1.03 \cdot 10^6, C = 0.185$					55	7960	3.8	»	»
110	1592	2.6	БР	10	»	»	5.2	»	10.0
60	3980	3.3	»	»	50	3980	2.3	»	»
60	7960	6.3	»	»	45	1592	1.8	»	12.5
40	31840	12.1	»	12.5	32	15920	8.6	»	»
»	23880	9.7	»	»	»	»	10.8	»	»
»	15920	6.85	»	»	35	7960	5.0	»	65
105	»	7.9	»	»	100	15920	7.7	ЭЯ — 1Т	»
120	7960	3.6	»	»	»	»	8.9	»	»
140	3980	2.45	»	»	85	3980	2.7	»	»
130	1592	1.68	»	10.0	»	»	3.92	»	»
28	15920	8.4	»	12.5	»	»	2.93	»	»
»	»	7.95	»	»	»	»	3.5	»	»
40	7960	6.5	»	»	95	1592	1.42	»	»
80	11940	8.1	ЭЯ — 1Т	64	135	»	1.04	»	60
»	3980	4.4	»	»	145	»	1.2	»	»
»	2388	4.36	»	65	135	3980	1.8	»	»
110	»	2.94	»	64	122	7960	5.1	»	»
150	1592	2.6	»	»	168	»	3.8	»	»
142	»	1.38	»	60	50	31840	15.2	БР	12.5
82	3980	2.6	»	»	45	23880	13.5	»	»
155	7960	3.8	»	»	50	15920	9.6	»	»
148	11940	4.25	»	»	120	31840	12.7	»	»
45	7960	7.43	»	»	180	39800	9.8	»	»
»	15920	8.7	БР	12.5	190	15920	3.8	»	»
40	23880	8.42	»	»	38	31840	16.4	»	5.0
»	31840	9.5	»	»	40	23880	10.5	»	»
50	»	12.6	»	»	35	15920	8.05	»	»
112	»	9.0	»	»	50	3980	3.9	»	»
170	15920	3.88	»	»	40	1592	2.2	»	»
38	31840	10.4	»	5.0	»	»	2.68	»	»

и Дина [5] при работе с ракетным топливом JP-4. Можно предположить, что отмеченная разница температур внутренней поверхности трубки и пограничного слоя жидкости происходит за счет перепада температуры в слое нагара. Подсчеты показали, что теплопроводность материала нагара в этом случае должна быть порядка  $0.1 \text{ ккал} / \text{м} \cdot ^\circ\text{С} \cdot \text{час}$ .

Таким образом, возникновение паровой пленки при кризисе происходит не на металлической поверхности стенки трубки, а на поверхности слоя нагара и кризис в некоторых случаях затягивается. За критическую тепловую нагрузку в этих опытах принималась величина  $q_{*}$ , соответствующая точке начала самопроизвольного роста  $t_w$ .

Таблица 2

$P \text{ атм}$	$N$	$N_1$	$N_1, \%$	$N_2$	$N_2, \%$	$T_0, ^\circ\text{С}$	$T_*, ^\circ\text{С}$
5	5	4	80	1	20	115—135	145—175
10	43	22	51	21	49	150—190	140—205
30	35	17	48.5	18	51.5	170—195	185—220
50	36	4	11	32	89	180—220	220—225
70	37	3	8	34	92	195—260	235—250
Итого	156	50	32	106	68	—	—

Очистка трубки от нагара позволяла проводить повторные опыты, причем наблюдалась хорошая повторяемость результатов. При длительной циркуляции спирт изменялся, наблюдалось увеличение кислотности, содержание воды, появление взвешенных частиц и т. п. Поэтому после десятка опытов спирт в контуре полностью заменялся.

Результаты опытов. Всего было проведено 156 опытов, данные по которым представлены в табл. 1. Опыты проводились отдельными сериями с сохранением постоянного давления в каждой серии. Опытов при малом недогреве  $8-10^\circ$  было очень мало, и пульсационных режимов, отмеченных для воды в работе [6], не наблюдалось. Предлагаемые ниже расчетные зависимости относятся к области больших недогревов  $\Delta t > 20^\circ$  и беспульсационных режимов течения.

В табл. 2 дано число опытов  $N$ , проведенных при разных давлениях  $p$  и указаны числа  $N_1$  и  $N_2$  кризисов первого и второго типа  $N = N_1 + N_2$ . Из таблицы видно, что при малых давлениях  $p = 5$  и  $10 \text{ атм}$  кризис чаще возникал по 1-му типу, т. е. в чистом виде, хотя и при этих давлениях наблюдались случаи нагарообразования. По мере роста давления до 30, 50 и  $70 \text{ атм}$  число кризисов 2-го типа, осложненных термическим разложением, все возрастало и при  $70 \text{ атм}$  кризисы 1-го типа составляли всего 8%. Уменьшение доли кризисов 1-го типа наблюдалось также с повышением скорости течения.

В табл. 2 показаны также температуры стенки, при которых отмечались, соответственно, начало термического разложения спирта  $T_0$  и момент возникновения кризиса в чистом виде  $T_*$ . Как видно, эти температуры перекрывают друг друга и при всех давлениях возможно возникновение кризиса обоих типов.

Обсуждение результатов. В работе [1] показано, что для воды в широком диапазоне давлений, недогрева и скоростей течения жидкости справедлива эмпирическая формула

$$q_* = A(1 + B\Delta t)(1 + CW)^{0.8} \quad (1)$$

где  $A, B, C$  — коэффициенты, зависящие только от давления.

Применение уравнения (1) к метиловому спирту при обработке данных описываемых опытов позволило установить, что характер изменения коэффициентов  $A, B, C$  для обеих жидкостей одинаков при одинаковых приведенных давлениях  $\pi = p/p_*$  или соответствующих им приведенных температурах  $\tau = T/T_*$ , где  $p_*, T_*$  — соответственно, давление и температура в критической точке данного вещества.

Отмеченный факт позволяет выразить коэффициенты уравнения (1) в критериальной форме. В этом случае величина  $A$  представляет то гипотетическое значение  $q_*$ , которое должно иметь место при нулевом недогреве и нулевой скорости течения

$$q_* = 1.55 \cdot 10^6 \frac{K_2^{0.65} K_5^{0.2}}{(K_1)_1} \quad (2)$$

$$K_1 = \frac{q_{c,p} \gamma_1 \sigma^{1/2}}{r \gamma_2 \lambda (\gamma_1 - \gamma_2)^{1/2}}, \quad K_2 = \frac{\sigma^{1/2} (\gamma_1 - \gamma_2)^{1/2}}{427 r \gamma_2}, \quad K_5 = \frac{\gamma_1 \sigma^{3/2}}{g \mu^2 (\gamma_1 - \gamma_2)^{1/2}} \quad (3)$$

Здесь  $\gamma_1, \gamma_2$  — удельные веса жидкости и пара на линии насыщения;  $c_p, r, \sigma, \mu, \lambda$  — соответственно, теплоемкость, скрытая теплота парообразования, поверхностное

натяжение, вязкость и теплопроводность жидкости при тех же условиях;  $g = 9.81 \text{ мсек}^{-2}$  — ускорение силы тяжести; 427 — механический эквивалент тепла [кжм / ккал];  $(K_1)_1$  — значение при  $q = 1$ .

Влияние недогрева на кризис кипения, коэффициент  $B$  в уравнении (1), получено из следующих соображений. С. С. Кутателадзе [7] показал, что влияние недогрева на кризис в условиях естественной конвекции выражается соотношением

$$q_*/q_0 = 1 - D \left( \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right)^n \frac{\Delta i}{r}, \quad \Delta i = i_s - i' \quad (4)$$

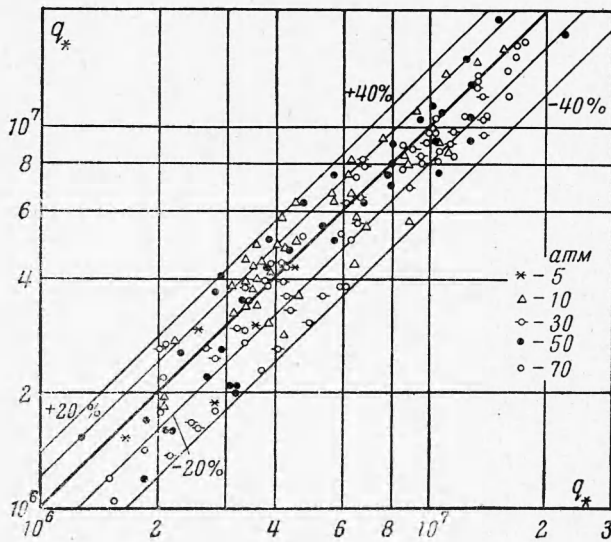
Здесь  $\Delta i$  отрицательно при недогреве, а  $q_0$  соответствует  $q_*$  при нулевом недогреве. Обработка опытных данных по воде, спиртам и другим органическим жидкостям позволила заменить в случае принудительного течения уравнение (4) более простым соотношением по уравнению (1).

Оказалось, что для всех исследованных теплоносителей коэффициент  $B$  в этом уравнении обратно пропорционален абсолютной температуре кипения  $T_s$  при данном давлении.

Для воды  
 $B = 9.5 / T_s$ ,

для метилового спирта  
 $B = 6.25 / T_s$

Для учета влияния скорости течения на кризис кипения (коэффициент  $C$  в уравнении (1)) была использована работа [8], в которой показано, что разница между устойчивостью парового пузыря на поверхности нагрева при свободной конвекции и при принудительном течении может быть учтена критерием Вебера



Фиг. 2. Сравнение экспериментальных данных по  $q_*$  с расчетом по уравнениям (2) и (14)

$$W = \frac{w^2 l \gamma_1}{g \sigma}, \quad \text{или} \quad W = \frac{w^2 \gamma_1}{g \sigma^{1/2} (\gamma_1 - \gamma_2)^{1/2}} \quad (5)$$

если за геометрический размер  $l$  принять величину, пропорциональную отрывному диаметру парового пузыря при свободной конвекции. При этих условиях для коэффициента  $C$  было получено выражение ( $P$  — критерий Прандтля)

$$C = 0.0895 \frac{W^{0.4} P^{0.1}}{K_3^{0.5} K_5^{0.25}} \left( \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right)^{0.45}, \quad P = 3600 g \frac{\mu c_p}{\lambda} \quad \left( K_3 = \frac{r}{T_s c_p} \right)$$

Таким образом, величина теплового потока при кризисе кипения в условиях принудительного течения и недогрева основной массы жидкости до температуры насыщения определяется в общем виде критериальным уравнением

$$K_1 = F(K_2, K_3, K_5, P, W, \gamma_1 / \gamma_2, \Delta t / T_s) \quad (6)$$

или его конкретной формой для рассматриваемого теплоносителя — метилового спирта

$$q_* = 1.55 \cdot 10^6 \frac{K_2^{0.65} K_5^{0.2}}{(K_1)_1} \left( 1 + \frac{6.25}{T_s} \Delta t \right) \left[ 1 + 0.0895 \frac{W^{0.4} P^{0.1}}{K_3^{0.5} K_5^{0.25}} \left( \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \right)^{0.45} \right] \quad (7)$$

Сравнение коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$  с опытными данными показало, что разница между расчетными и опытными значениями  $A$  при давлениях, удаленных от критической точки, не превышает 2% и в околокритической области 8.5%. Для коэффициента  $B$  таких расхождений вообще не наблюдалось. Для коэффициента  $C$  отмечены расхождения более значительные, причем они увеличиваются по мере приближения к критической области, что можно объяснить неточностью определения физических свойств вещества и нечеткостью явления кризиса кипения в этой области.

На фиг. 2 дано сравнение опытных и расчетных значений  $q_*$  при всех рабочих давлениях. Из графика видно, что свыше 60% всех опытов укладывается в полосу  $\pm 20\%$  от расчетной линии, а остальные точки отклоняются не больше чем на 40%.

Проведенное исследование кризиса кипения метилового спирта при принудительном течении в трубках малого диаметра в широком диапазоне изменения давления в контуре, скорости течения и недогрева до температуры насыщения показало отсутствие влияния на кризис кипения данной жидкости размеров трубки. При всех давлениях отмечены случаи осложнения кризиса кипения термическим разложением спирта на поверхности нагрева, причем с увеличением давления вероятность разложения увеличивается. Проведенная обработка опытов позволяет предложить критериальное уравнение (7) для определения  $q_*$  пригодно для воды, метилового спирта и других жидкостей.

Поступила 18 VI 1962

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Поварнин П. И., Семенов С. Т. Исследование кризиса кипения при течении недогретой воды в трубках малых диаметров при высоких давлениях. Теплоэнергетика, 1959, № 4; 1960, № 1.
2. Аладьев И. Т., Додонов Л. Д., Удалов В. С. Теплоотдача и критические тепловые потоки при кипении недогретой воды в трубах. Атомная энергия, 1959, т. 6, вып. 1.
3. Зенкевич Б. А., Субботин В. И. Критические тепловые нагрузки при вынужденном течении воды, не догретой до кипения. Атомная энергия, 1957, т. 2, вып. 8.
4. Стерман Л. С., Стюшин Н. Г. Влияние циркуляции на кризис теплообмена при кипении изопропилового спирта. Ж. техн. физ., 1952, № 3.
5. Бэйли С., Дин Л. Исследование теплообмена к топливу ракетного двигателя JP-4. Вопр. ракетн. техн. Сб. перев. и обз. ин. период. лит., 1955, № 4.
6. Аладьев И. Т., Дорожук В. Е., Миропольский З. Л., Стырикович М. А. Кризис кипения в трубах. Докл. на 2-й Междунар. конф. по теплообмену в Колорадо. США, 1961.
7. Кутателадзе С. С. Критические тепловые потоки при течении смачивающей жидкости с ядром, не догретым до температуры насыщения. Научн. докл. Высш. школы. Сб. «Энергетика», 1959, № 2.
8. Телетов С. Г. О максимальном размере парового пузыря. Изд-во АН СССР, Изв. ЭНИН, 1940, т. XI.

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМЫ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЯ В ОСЕСИММЕТРИЧНОМ ПОТОКЕ ЖИДКОСТИ

О. М. Киселев (Казань)

Известно лишь несколько работ, посвященных определению формы свободных границ потока с учетом действия сил поверхностного натяжения. Задача о нахождении формы двумерного пузыря в плоском потенциальном потоке несжимаемой жидкости внутри прямолинейного канала была решена Н. Е. Жуковским [1]. В 1955 г. Мак-Леод [2] другим методом решил частный случай задачи Жуковского (поток неограниченный, давление внутри пузыря равно давлению торможения). Наконец М. И. Гуревич [3] исследовал влияние сил поверхностного натяжения на коэффициент сжатия струи. Ниже предлагается приближенный метод определения формы газового пузыря в осесимметричном потенциальном потоке несжимаемой жидкости. Показывается, что искомая форма мало отличается от сплюснутого эллипсоида вращения. Определяются основные размеры пузыря в зависимости от физических параметров потока.

##### Обозначения

$V$ — скорость потока,	$R_1, R_2$ — главные радиусы кривизны пузыря,
$V_\infty$ — скорость невозмущенного потока,	$2a$ — длина пузыря (диаметр, параллельный оси $x$ ),
$v$ — безразмерная скорость, $v = V/V_\infty$	$2b$ — толщина пузыря (диаметр, перпендикулярный к оси $x$ ),
$p$ — давление в жидкости,	$c$ — относительное удлинение
$p_0$ — давление заторможенного потока,	$c = a/b$
$p_i$ — давление газа в пузыре	$\rho$ — плотность жидкости.
$(p_i = \text{const}, p_i \geq p_0)$ ,	
$T$ — сила поверхностного натяжения	
$(T = \text{const})$ ,	