

А.В. Клименко, А.М. Сударчиков, В.В. Клименко

Центр высоких технологий, Московский энергетический институт (технический университет), Россия

КРИЗИС КИПЕНИЯ АЗОТА В КАНАЛЕ В УСЛОВИЯХ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ ПРИ ВЫСОКИХ РАСХОДАХ И КРИТИЧЕСКИХ ПАРСОДЕРЖАНИЯХ

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментального исследования кризиса кипения вынужденного потока азота в канале малого диаметра в ранее не изученной области высоких массовых скоростей $G > 600$ кг/(м²·с) и критических паросодержаний $x_{кр} > 0.5$. Показано, что увеличение массовой скорости приводит к уменьшению критического теплового потока, что качественно согласуется с таблицей рекомендуемых значений критического теплового потока для кипения вынужденного потока азота в канале диаметром 8 мм [1]. Однако таблица дает более низкие значения удельного критического теплового потока, чем это зафиксировано в настоящих экспериментах.

С использованием полученных в данной работе опытных значений критического теплового потока была проведена модификация фрагмента таблицы [1] для давления $p = 1.5 \cdot 10^5$ Па.

1. ВВЕДЕНИЕ

Кризис теплоотдачи при кипении жидкости в различных режимных и геометрических условиях по-прежнему относится к наиболее сложным явлениям термо- гидродинамики двухфазных потоков, исследованию которого посвящено большое число экспериментальных исследований как в нашей стране, так и за рубежом. Возникновение кризиса кипения при течении теплоносителя в обогреваемом канале может не только ограничить величину теплового потока, отводимого от поверхности теплообмена, но и привести к драматическим, разрушительным последствиям для теплообменного оборудования в целом. Поэтому исследование условий возникновения кризиса кипения в различных возможных условиях эксплуатации того или иного теплоносителя является чрезвычайно важным этапом проектирования теплообменного оборудования, использующего кипящий в канале теплоноситель.

Из всех теплоносителей наименее изучен кризис кипения криогенных жидкостей. В свою очередь из всех криогенных жидкостей азоту, по-видимому, посвящено наибольшее число экспериментальных исследований. Опыты проводились на каналах различной геометрии при различных значениях режимных параметров. Накоплен большой массив опытных значений критического теплового потока для кипения азота в каналах в широких диапазонах изменения давления, расхода, критического паросодержания. Однако, в целом экспериментальные исследования кризиса кипения азота в канале не носили систематического характера - существуют диапа-

зоны изменения режимных параметров, которые или исследованы недостаточно полно или не исследованы вообще, например, высокие массовые скорости и критические паросодержания. Так, в опытах [2] были достигнуты сравнительно высокие значения массовой скорости $G = 800$ кг/(м²·с), однако, при этом критическое паросодержание не превышало значения равного $x_{кр} = 0.362$. В [3] массовая скорость в опытах достигала значения $G = 1307$ кг/(м²·с), при этом критическое паросодержание было равно $x_{кр} = 0.18$. В [4] массовая скорость имела экстремально высокое значение, равное $G = 9500$ кг/(м²·с), но при этом наибольшее значение критического паросодержания было равно $x_{кр} = 0.105$. В [1], где, по-видимому, впервые была предпринята попытка провести систематические исследования кризиса кипения вынужденного потока азота в канале в широких диапазонах изменения давления, массовой скорости и критического паросодержания, наибольшее достигнутое в опытах значение критического паросодержания было равно $x_{кр} = 0.976$, однако, массовая скорость в этих опытах не превышала значение равное $G = 730.8$ кг/(м²·с).

Таким образом, в известных экспериментальных работах, посвященных изучению кризиса кипения вынужденного потока азота в канале, были проведены опыты или при высоких критических паросодержаниях и не высоких массовых скоростях, или при высоких массовых скоростях, но не высоких критических паросодержаниях, а область высоких массовых скоростей и высоких критических паросодержаний не охвачена.

Данная работа является продолжением цикла исследований кризиса кипения вынужденного потока азота в канале в не исследованных или мало исследованных диапазонах изменения режимных параметров с целью модификации таблицы [1], см. также [8, 9].

2. УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ. ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ

Опыты проводились на экспериментальной установке, подробно описанной в [5, 6]. В качестве экспериментального образца использовалась круглая труба внутренним диаметром 4 мм, обогреваемой длиной 1556 мм, толщиной стенки 1 мм, изготовленная из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. Ориентация образца вертикальная, течение теплоносителя подъемное.

В опытах проводилось измерение распределения температуры стенки образца по его длине, температуры потока на входе в образец и выходе из него, давления на входе в образец и расхода теплоносителя. Для измерения температуры использовались медь-константановые термопары с диаметром электродов 0.2 мм. Измерение давления осуществлялось с помощью датчика давления мембранного типа. Расход измерялся с помощью турбинного датчика расхода. Все измеряемые в опытах величины регистрировались микроЭВМ.

Опыты проводились в следующих условиях: давление $p = (1.12 \div 2.4) \cdot 10^5$ Па, массовая скорость $G = (559.5 \div 1128.8)$ кг/(м²·с), массовое расходное паросодержание в месте возникновения кризиса кипения (критическое паросодержание) $x_{кр} = (0.5 \div 1.0)$. На вход экспериментального образца во всех опытах поступала жидкость, недогретая до температуры насыщения.

При проведении опытов первоначально устанавливались необходимые значения давления, расхода и температуры жидкости на входе в образец. Далее тепловой поток, подводимый к экспериментальному образцу, постепенно небольшими интервалами увеличивался, вплоть до возникновения кризиса кипения. Возникновение кризиса определялось по резкому росту температуры стенки образца.

Анализ и обработка полученных в работе экспериментальных результатов основывались на локальной гипотезе происхождения кризиса. Согласно этой гипотезе возникновение кризиса кипения в канале обусловлено той термо- гидродинамической обстановкой, которая складывается непосредственно в кризисном сечении канала. Массовое расходное паросодержание потока рассчитывалось по балансовому соотношению, записанному в предположении термической равновесности двухфазного потока, т. е.:

$$x = \frac{i'_{вх} - i'_s(p_{вх})}{r} + \left(\frac{4l}{d}\right) \left(\frac{q}{rG}\right). \quad (1)$$

Погрешность измерений в опытах была следующей: удельного критического теплового потока $q_{кр}$ не более 3.0 %, критического паросодержания $x_{кр}$ - 3.6 %, массовой скорости G - 1.2 %, давления p - 2.0 %.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Исследованные диапазоны изменения массовой скорости и критического паросодержания

На рис. 1 показаны диапазоны изменения массовой скорости и критического паросодержания, в которых были проведены экспериментальные исследования кризиса кипения вынужденного потока азота в канале. Светлыми символами на рис. 1 обозначены диапазоны изменения G и $x_{кр}$, исследованные в данной работе. Из рис. 1 можно видеть, что до

настоящей работы область значений массовой скорости $G \geq 600$ кг/(м²·с) и критического паросодержания более приблизительно $x_{кр} \geq 0.5$ была не исследована.

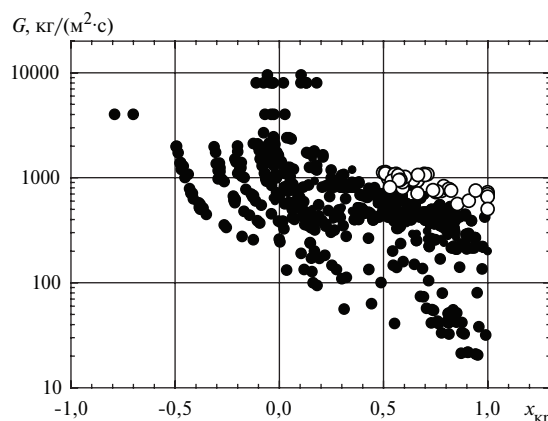


Рис. 1. Исследованные диапазоны изменения массовой скорости и критического паросодержания

Все опытные значения $q_{кр}$ на рисунках, полученные как в настоящей работе, так и в других исследованиях, были приведены к диаметру 8 мм согласно рекомендациям [7 - 9] по соотношению:

$$\frac{q_{кр}^{d=8}}{q_{кр}^d} = \left(\frac{d}{8}\right)^{1/3}. \quad (2)$$

3.2 Влияние массовой скорости на критический тепловой поток

На рис. 2, 3 приведены опытные данные, показывающие влияние G на $q_{кр}$. На рисунках приведена кривая $q_{кр}(G)$, рассчитанная по таблице рекомендуемых значений $q_{кр}$ [1]. Кроме этого, на рис. 2 приведены опытные значения $q_{кр}$, полученные в экспериментах [1], а на рис. 3 - в экспериментах [3].

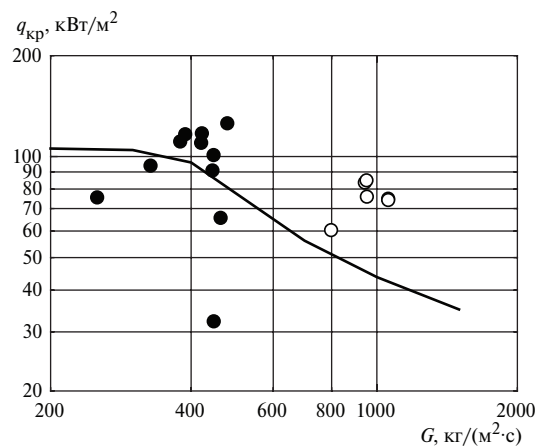


Рис. 2. Влияние массовой скорости на критический тепловой поток, о - настоящая работа $p = (1.42 \div 1.64) \cdot 10^5$ Па, $x_{кр} = 0.58 \div 0.67$; • - данные [1], $p = (1.49 \div 1.58) \cdot 10^5$ Па, $x_{кр} = 0.57 \div 0.66$; — расчет по [1], $p = 1.5 \cdot 10^5$ Па, $x_{кр} = 0.6$

Таблица 1. Критическая плотность теплового потока $q_{кр}$, кВт/м², для кипения вынужденного потока азота в канале диаметром 8 мм для $p = 1.5 \cdot 10^5$ Па

G , кг/(м ² ·с)	Критическое массовое расходное паросодержание $x_{кр}$							
	0.25	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
400	182.7	177.5	156.5	130.5	83.7	40.2	37.2	33.9
500	181.7	175.8	155.0	124.4	82.7	48.8	45.5	52.8
600	181.5	174.4	151.4	120.8	80.3	47.5	50.6	51.6
700	178.6	172.0	144.1	115.3	73.6	39.5	61.0	27.3
800	167.3	159.1	132.2	93.1	60.4	54.3	65.2	49.4
900	157.1	148.4	122.6	76.8	58.9	54.2	48.9	36.7
1000	148.5	139.7	115.7	92.8	64.0	39.4	39.3	15.1
1100	138.6	129.1	103.5	64.0	68.2	76.2	41.4	18.9
1200	130.6	121.2	96.7	68.3	65.5	62.4	39.3	21.0
1300	125.3	116.8	97.0	76.2	62.8	50.4	32.5	18.9
1400	121.9	114.9	99.4	81.8	60.8	40.5	24.9	14.6
1500	119.4	113.6	101.3	88.4	59.2	30.4	19.1	9.4

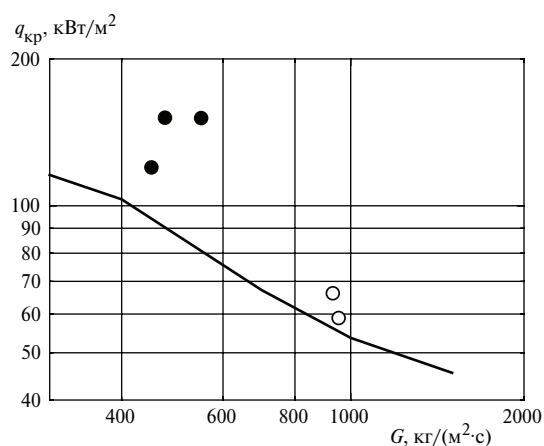


Рис. 3. Влияние массовой скорости на критический тепловой поток, о - настоящая работа, $p = (2.2 \div 2.4) \cdot 10^5$ Па, $x_{кр} = 0.66 \div 0.67$; • данные [3], $p = 2.451 \cdot 10^5$ Па, $x_{кр} = 0.6 \div 0.64$; — расчет по [1], $p = 2.5 \cdot 10^5$ Па, $x_{кр} = 0.6$

Из рисунков можно видеть, что опытные данные настоящей работы располагаются выше расчетной кривой $q_{кр}(G)$. Это же обнаруживается и для опытных данных [3] на рис. 3 и большей части опытных данных [1] на рис. 2. Таким образом, расчет $q_{кр}$ по таблице [1] для исследованных в данной работе диапазонов изменения p , G , $x_{кр}$ более, чем на (30 ÷ 70) % (см. например рис. 2) занижает значения удельного критического теплового потока.

Обратим внимание на поведение опытных данных [1] на рис. 2 в области значений массовой скорости $G \approx (400 \div 500)$ кг/(м²·с). Можно предположить, что опытные значения $q_{кр}$ из [1], располагающиеся ниже расчетной кривой, находятся под влиянием гидродинамической неустойчивости течения в канале кипящего азота. К сожалению, для определенного ответа на этот вопрос отсутствует первичная эмпирическая информация, а также для опытных данных из работы [1] $Ja \gg 4,4$, что не позволя-

ет использовать соотношение [10] для определения условий наступления гидродинамической неустойчивости.

На рис. 4 также приведены опытные данные настоящей работы, показывающие влияние массовой скорости на $q_{кр}$ при высоких $x_{кр}$. Из рисунка видно весьма значительное расхождение между опытными значениями $q_{кр}$ и рассчитанными по [1] - опытные значения $q_{кр}$ настоящей работы более, чем в 3 раза превышают расчетные значения $q_{кр}$.

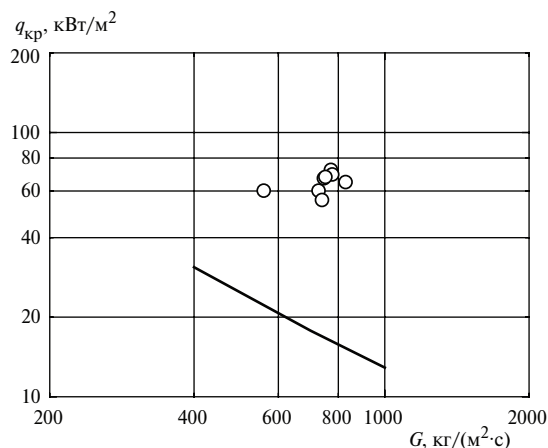


Рис. 4. Влияние массовой скорости на критический тепловой поток, о - настоящая работа $p = (1.13 \div 1.36) \cdot 10^5$ Па, $x_{кр} = 0.75 \div 0.86$; — расчет по [1] $p = 1.25 \cdot 10^5$ Па, $x_{кр} = 0.8$

3.3. Таблица рекомендуемых значений критического теплового потока

В работе с использованием полученных опытных значений $q_{кр}$ была проведена модификация фрагмента таблицы рекомендуемых значений удельного критического теплового потока [1] для давления $p = 1.5 \cdot 10^5$ Па. Процедура модификации заключалась в применении метода наименьших

квадратов к массиву значений удельного критического теплового потока, включающему в себя полученные в данной работе опытные значения $q_{кр}$, для ранее не исследованных значений массовой скорости и критического паросодержания. Результаты представлены в табл. 1. Табл. 1 охвачены следующие диапазоны изменения режимных параметров: массовая скорость $G = (400 \div 1500)$ кг/(м²·с), критическое паросодержание $x_{кр} = 0.25 \div 0.9$. Изменения коснулись главным образом области высоких значений критического паросодержания, более $x_{кр} = 0.7 \div 0.9$ для всех значений G . Для этих значений $x_{кр}$, модифицированный фрагмент рекомендует более высокие значения удельного критического теплового потока, чем таблица [1].

Стандартное отклонение для модифицированного фрагмента не превышает 9.6 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведено экспериментальное исследование кризиса кипения вынужденного потока азота в канале при высоких значениях массовой скорости $G = (559.5 \div 1128.8)$ кг/(м²·с) и критического паросодержания $x_{кр} = (0.5 \div 1.0)$. Показано, что таблица рекомендуемых значений критического теплового потока [1], по крайней мере, для исследованных в данной работе диапазонов изменения режимных параметров указывает меньшие значения $q_{кр}$, чем было зафиксировано в опытах в данной работе.

2. С учетом вновь полученных опытных значений критического теплового потока проведена модификация фрагмента таблицы [1] для давления $p = 1.5 \cdot 10^5$ Па. Изменения коснулись главным образом области высоких значений критического паросодержания - $x_{кр} > 0.7$.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

p - давление, 10⁵ Па;

G - массовая скорость, кг/(м²·с);

x - массовое расходное паросодержание;

q - удельный тепловой поток, кВт/м²;

i - энтальпия, Дж/кг;

d - диаметр, м;

l - длина, м;

r - теплота парообразования, Дж/кг.

Индексы:

кр - критический;

вх - вход;

' - жидкость;

s - соответствует состоянию насыщения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Аль-Абуд Ф.** Экспериментальное исследование и построение таблицы рекомендуемых значений критической плотности теплового потока при вынужденном движении двухфазного потока азота в равномерно обогреваемом вертикальном канале: Дис. ... канд. тех. наук. М.: МЭИ. 1991.
2. **Критические** тепловые потоки при кипении азота в вертикальном канале / В.И. Деев, В.Н. Новиков, В.В. Архипов, Ю.В. Гендаев и др. // Тр. МИФИ. 1986. С.63-65.
3. **Perroud P., Rebire J., Weil L.** Convection forcee de l'azote et de l'hydrogene liquides // Proc. of the Intern. Inst. of Refrigeration, Comission I, Grenoble. 1965. P. 155-171.
4. **Верхман С.И.** Критические тепловые потоки при кипении жидкого азота, недогретого до температуры насыщения в условиях вынужденного движения // ПМТФ. 1969. № 1.
5. **Klimenko V.V., Sudarchikov A.M.** Investigation of forced flow boiling of nitrogen in a long vertical tube // Cryogenics. 1983. V.23. No. 7. P. 379-385.
6. **Klimenko A.V., Sudarchikov A.M., Berezov F.B., Berezov V.B.** Peculiarities of Two-Phase Forced Flow of Nitrogen in Long Heated Channel // Proc. of the Intern. Symp. on the Physics of Heat Transfer in Boiling and Condensation. 1997. Moscow. P. 73-78.
7. **Aboud F., Klimenko V.V., Fyodorov M.V., Fomichev Yu.A. and Shvaykovsky Yu.Ye.** Heat Transfer and Crisis Study with Two-Phase Forced of Nitrogen in a Vertical Channel // Proc. of the 2nd World Conf. on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics. 1991. Yugoslavia. P. 952 - 959.
8. **Клименко А.В., Сударчиков А.В., Клименко В.В.** Кризис кипения азота в канале при малых расходах и высоких давлениях // Тр. 2-й Рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 4. 1998. С. 148-151.
9. **Клименко А. В., Сударчиков А.М., Клименко В.В., Девяткин А.С., Макаров М.А.** Экспериментальное исследование кризиса кипения вынужденного потока азота в канале при высоких расходах // Тр. 3-й Рос. нац. конф. по теплообмену. Т. 4. 2002. С. 111-114.
10. **Сударчиков А.М.** Гидродинамическая неустойчивость в кипящем потоке азота // Вестник МЭИ. 2005. №4. С.33 - 39.