

## К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ДИАМЕТРА ТРУБЫ НА ГРАНИЧНОЕ ПАРСОДЕРЖАНИЕ ПРИ КРИЗИСЕ КИПЕНИЯ

### АННОТАЦИЯ

С использованием предложенной ранее формулы проанализировано влияние диаметра на граничное паросодержание при кризисе кипения в каналах.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из дискуссионных тем проблемы кризиса теплоотдачи при кипении является вопрос о влиянии диаметра канала на граничное паросодержание [1-3].

Для расчета граничного паросодержания при кипении воды в трубах предложен ряд эмпирических зависимостей, часть из которых проанализирована в [4]. Интерполяционный характер и размерный вид существенно ограничивают области применимости и снижают практическую ценность этих соотношений. В значительной мере лишены этих недостатков безразмерные соотношения В.Е. Дорошука [5] и С.С. Кутателадзе [6], полученные из анализа механизма кризиса. Однако, предложенные в [5, 6] формулы не отражают влияния диаметра канала, и поэтому не могут считаться универсальными. Для учета этого влияния обычно используются эмпирические поправки в виде степенной [7] или экспоненциальной [3] функций диаметра. Так, в [7] для зависимости граничного паросодержания от диаметра трубы рекомендуется поправка вида  $x_{гр}^0 \sim d^{-n}$ , где  $n = 0,15 \dots 0,25$ , причем «...в общем случае поправка зависит также от массовой скорости и давления». Рекомендуемая в [3] поправка вида  $x_{гр}^0 \sim \exp(-md)$  также является сложной функцией режимных параметров. Таким образом, в общем случае степень влияния диаметра трубы на граничное паросодержание определяется не только величиной самого диаметра, но сочетанием всех основных параметров, как геометрических, так и режимных.

### 2. ОБОБЩЕНИЕ ОПЫТНЫХ ДАННЫХ О ГРАНИЧНЫХ ПАРСОДЕРЖАНИЯХ

Более 20 лет назад авторами [8] было предложено обобщать опытные данные о граничном паросодержании в зависимости от числа Вебера  $We' = (\rho W)^2 d / (\sigma \rho')$ . Предложенное ими соотношение:

$$x_{гр}^0 = 1 - 0,86 \exp(-19/\sqrt{We'}) \quad (1)$$

обобщало известные к тому времени данные о граничном паросодержании в круглых трубах с точно-

стью около 20%, что, согласно [7], соответствовало разбросу самих экспериментальных данных. Появившиеся с тех пор новые экспериментальные данные только подтвердили правильность выбора числа Вебера в качестве параметра обобщения.

На рис. 1 показано сравнение расчета по уравнению (1) с экспериментом для всего массива использованных в настоящем анализе данных о  $x_{гр}^0$  для труб. Режимные и геометрические параметры опытов по определению  $x_{гр}^0$  приведены в табл. 1.

Таблица 1

Литературный источник	$d$ , мм	$p$ , МПа	$\rho W$ , кг/(м <sup>2</sup> ·с)
[9]	3,84	3...8	4000...5000
	8	2,94...12,75	1000...5000
	11	9,8...12,75	1000...3200
[7]	8	3...16	350...5000
[4]	10	6,9...15,7	350...1000
[10]	18,7	4,9...14,7	450...1700
	14,9	14,7...16,7	1000...2700
	20	4,9...14,7	500...1500
[11]	4	4,9	2000...5000
	32,2	14,7	310...1110
[1, 12]	20	15,2	300...1000
	30	12,3...15,2	300...1000
	40	12,3...15,2	300...500
[2]	4	4,9...13,7	3000...5000
	6	4,9...9,8	2000...4000
	12	4,9...13,7	700...2000
[13]	20	4,9...15,7	400...2000
[14]	10	2,9...13,7	500...4000
[15]	10,8	3,0...15,0	160...550
[16]	15	4,1...6,98	55...1370
[17]	10,1	7,0...15,3	700...3200
[18]	5,8	6,9...13,7	1500...3000
	10,8	6,9...13,7	500...2000
[19]	10	6,9...13,7	500...2000
[20]	8	4,9...17,7	350...3000
[21]	10	6,9...17,7	350...1000
[22]	11	9,9...13,7	176...1000
[23]	5,8	2,4...14,7	385...1090

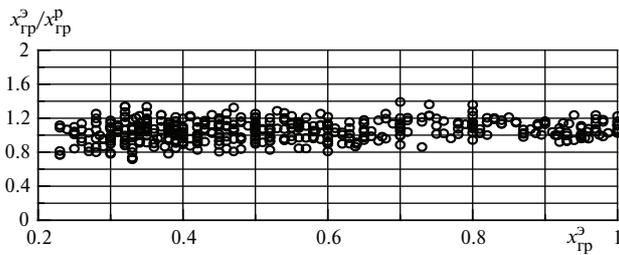


Рис. 1. Сопоставление экспериментальных данных о граничных паросодержаниях при кипении воды в трубах с расчетом по формуле (1). Общее число точек - 442, среднее отклонение - 5,57%, среднеквадратичное - 11,8%

Второй член в правой части соотношения (1), связанный с уносом жидкости в ядро потока, характеризует его влагосодержание, причем предэкспоненциальный множитель соответствует доле жидкости в потоке в сечении возникновения дисперсно-кольцевого режима течения. В связи с этим в [24] была предпринята попытка повысить точность формулы (1) путем учета начального влагосодержания потока с помощью эмпирических соотношений [25, 26] для нижней границы дисперсно-кольцевого режима течения. Наилучшие результаты дало использование в качестве нижней границы дисперсно-кольцевого режима соотношения Ю.Л. Сорокина [26], приведшее к формуле:

$$x_{гр}^0 = 1 - 0,86 (1 - x_{ндк}) \exp(-19/\sqrt{We'}), \quad (2)$$

где  $x_{ндк} = 3,2 \cdot \sqrt[4]{g\sigma(\rho' - \rho'')(\rho'')^2 / \rho W}$  - паросодержание в сечении возникновения дисперсно-кольцевого режима течения. При этом точность описания экспериментальных данных по сравнению с формулой (1) действительно повысилась: среднее отклонение снизилось на 5%, а среднеквадратичное - примерно на 1%. Результаты описания экспериментальных данных формулой (2) демонстрирует рис. 2.

### 3. АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ДИАМЕТРА НА ГРАНИЧНОЕ ПАРСОДЕРЖАНИЕ

Как уже указывалось выше, для учета этого влияния обычно используются эмпирические поправки в виде степенной или экспоненциальной функций диаметра, причем степень этого влияния оказывается функцией давления и массовой скорости. Уравнения (1) и (2) как раз и показывают, что влияние диаметра нельзя рассматривать в отрыве от влияния других параметров. В то же время из них следует, что при определенных сочетаниях режимных параметров влияние диаметра на величину граничного паросодержания можно аппроксимировать степенной зависимостью, как это демонстрируют рис. 3 и 4.

Что касается экспоненциальной функции влияния диаметра, предложенной в [3], то в виду отсутствия в [3] конкретной зависимости коэффициента  $m$  от режимных параметров, достоверно судить о степени её справедливости и предпочтительности по отношению к формуле (1) не представляется возможным.

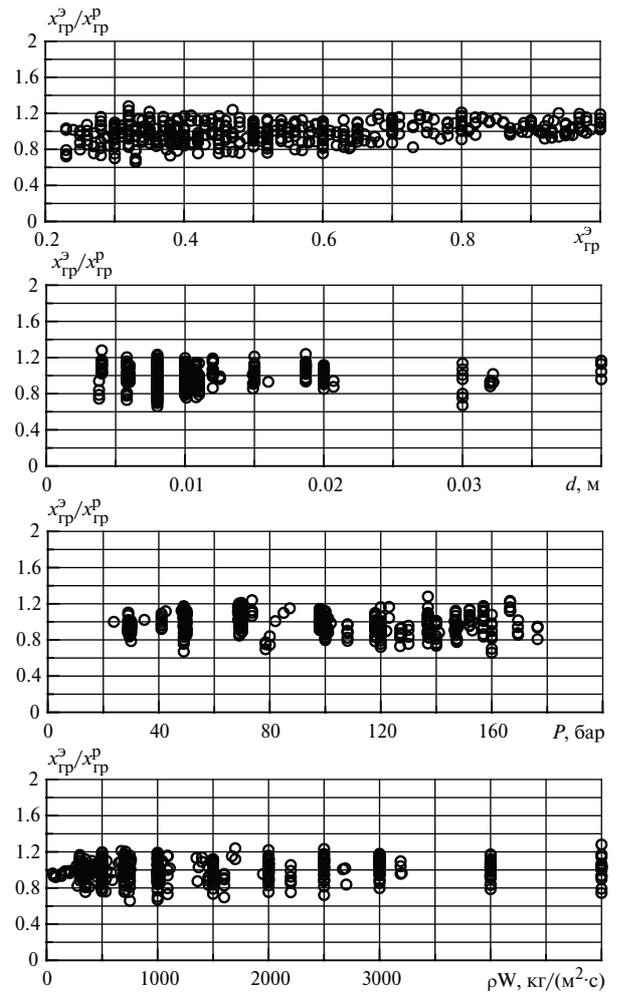


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных данных о граничных паросодержаниях при кипении воды в трубах с расчетом по формуле (2). Общее число точек - 442, среднее отклонение - 0,5%, среднеквадратичное - 11%

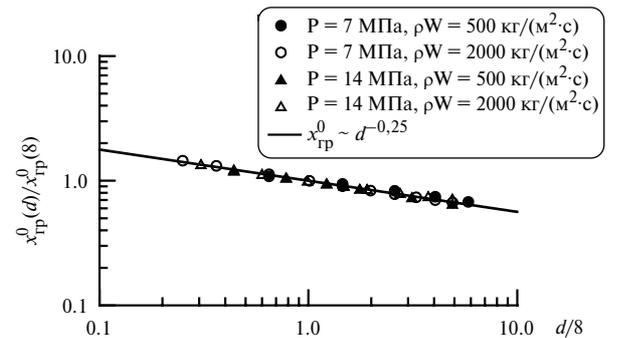


Рис. 3. Влияние диаметра трубы на граничное паросодержание. Значки - расчет по формуле (1)

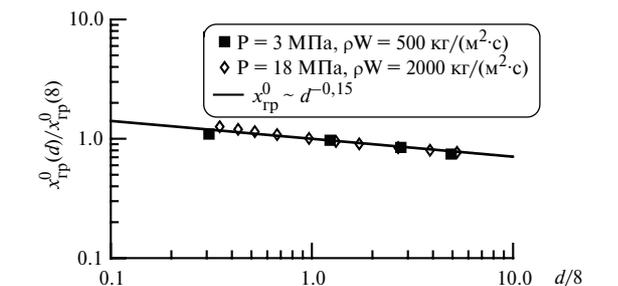


Рис. 4. Влияние диаметра трубы на граничное паросодержание. Значки - расчет по формуле (1)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, выполненный анализ показал, что уравнения (1) и (2) вполне адекватно отражают влияние всех основных параметров (в том числе и диаметра канала) в широком диапазоне их изменения. Соответственно, обобщенным параметром этого влияния является вышеуказанное число Вебера.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $p$  — давление, Н/м<sup>2</sup>;  
 $\rho W$  - массовая скорость, кг/(м<sup>2</sup>·с);  
 $d$  - диаметр канала, м;  
 $x_{гр}^0$  - граничное паросодержание;  
 $x_{гр}^э$  - экспериментальное значение граничного паросодержания;  
 $x_{гр}^р$  - расчетное значение граничного паросодержания;  
 $x_{ндк}$  - паросодержание начала дисперсно-кольцевого режима течения;  
 $\rho'$  - плотность воды на линии насыщения, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\rho''$  - плотность насыщенного водяного пара, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\sigma$  — поверхностное натяжение, Н/м;  
 $g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреевский А.А., Беляков И.И., Быков Г.С. и др. О влиянии диаметра канала на величину критической тепловой нагрузки и граничного паросодержания в области высоких давлений ( $p_p \geq 15$  МПа) // Энергомашиностроение. 1978. № 11. С. 14-16.
2. Левитан Л.Л., Ланцман Ф.П., Деднева Е.И. Исследование влияния диаметра трубы на кризис теплообмена второго рода // Теплоэнергетика. 1981. № 7. С.40-44.
3. Генделев В.Г. Влияние диаметра трубы на граничное паросодержание при кризисе кипения // Теплоэнергетика. 2002. № 10. С. 57-59.
4. Ремизов О.В. Исследование температурных условий работы парогенерирующей поверхности при кризисе теплоотдачи // Теплоэнергетика. 1978. № 2. С.16-20.
5. Дорошук В.Е. Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах. М.: Энергоатомиздат. 1983.
6. Кутателадзе С.С. О граничном паросодержании при кипении в круглой трубе// Теплоэнергетика. 1979. № 6. С.54-55.
7. Рекомендации по расчету кризиса теплоотдачи при кипении воды в круглых трубах: Препринт 1-57. М.: ИВТ АН СССР. 1980.
8. Гальченко Э.Ф., Сергеев В.В. К обобщению данных по граничным паросодержаниям // Теплоэнергетика. 1983. № 3. С.58-59.
9. Смолин В.Н., Шпанский С.В., Есиков В.И., Седова Т.К. Экспериментальные данные и методика расчета кризиса теплоотдачи при кипении воды, циркулирующей в трубах с равномерным и неравномерным тепловыделением // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. 1979. Вып.5(9). С.3-20.
10. Морозов В.Г. Экспериментальное изучение граничных паросодержаний при кризисе теплоотдачи второго рода // Теплофизика высоких температур. 1976. Т.14, Вып. 5. С.1114-1118.
11. Коньков А.С. Экспериментальное исследование условий ухудшения теплоотдачи при течении пароводяной смеси в обогреваемых трубах // Тр. ЦКТИ. 1965. Вып. 58. С.170-179.
12. Беляков И.И., Смирнов С.Н., Соколов В.В., Лаврентьев В.П. Исследование граничных условий ухудшения теплоотдачи в трубах больших диаметров // Теплоэнергетика. 1980. № 12. С.49-51.
13. Андреевский А.А. и др. Кризис теплообмена и режимы течения двухфазного потока// Тр. ЦКТИ. 1979. Вып.173. С.7-11.
14. Becker K. et al. Round tube burnout data for flow of boiling water at pressure between 30 and 200 bar: KTH-NEL-14. 1971.
15. Roko K. et al. Dryout characteristics at low mass velocities in a vertical straight tube of a steam generator // Heat Transfer, 1978: Proc. 6<sup>th</sup> Intern. Heat Transfer Conf., Toronto, Canada, 7-11 Aug. 1978. Vol.1. Ottawa. 1978. P.429-437.
16. Bailey N.A. Dryout and post dryout heat transfer at low flow in a single tube test section: AEEW-R1068. Winfrith. 1977.
17. Франс и др. Экспериментальное исследование кризиса теплоотдачи в длинной трубе с натриевым обогревом и эмпирические расчетные формулы // Теплопередача. 1981. Т.103. № 1. С.87-96.
18. Зенкевич Б.А., Песков О.Л., Петрищева Г.А. и др. Анализ и обобщение опытных данных по кризису теплоотдачи вынужденному течению кипящей воды в трубах. М.: Атомиздат. 1969.
19. Некрасов А.В., Логвинов С.А., Тестов И.И. Кризис теплоотдачи в парогенерирующей трубе при обогреве жидкометаллическим теплоносителем // Атомная энергия. 1975. Т. 39. Вып. 1. С. 20-23.
20. Дорошук В.Е., Левитан Л.Л., Ланцман Ф.П. Рекомендации к расчету кризисов теплообмена в круглой трубе при равномерном тепловыделении // Теплоэнергетика. 1975. № 12. С. 66-70.
21. Ремизов О.В., Воробьев В.А., Гальченко Э.Ф. Границы наступления режима с ухудшенной теплоотдачей и теплообмен в закризисной области / Физико-энергетический институт: Препринт ФЭИ-653. Обнинск. 1975.
22. Кириллов П.Л., Титов В.Ф., Грачев Н.С. и др. К расчету кризиса теплообмена в парогенераторах, обогреваемых натрием // Атомная энергия. 1982. Т. 52. Вып. 1. С. 21-24.
23. Кашинский В.И., Очков В.Ф., Романовский И.М. Экспериментальные данные по граничным паросодержаниям в трубах при малых массовых скоростях // Науч. тр. Моск. энерг. ин-т. 1985. № 58. С. 59-66.
24. Сергеев В.В. Закризисный теплообмен в элементах ЯЭУ: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Обнинск, 2005.
25. Боровский Л.Я. Идентификация режимов течения пароводяных потоков высоких параметров методом оптической голографии: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М.: ВТИ, 1984.
26. Сорокин Ю.Л., Анисимова О.Л. Критическая скорость газа для процесса опрокидывания пленки и нижней границы дисперсно-кольцевого режима // Энергомашиностроение. 1984. № 11. С. 11-14.