

Общероссийский математический портал

А. И. Бронштейн, Н. Б. Гюльмамедов, Исследование кризиса теплообмена второго рода при кипении водных растворов Na_2SO_4 , *TBT*, 1990, том 28, выпуск 6, 1176–1180

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением
<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 34.239.153.44

6 ноября 2024 г., 08:04:08



УДК 536.248.2 © 1990 г.

*А. И. Бронштейн, Н. Б. Гюльмамедов***ИССЛЕДОВАНИЕ КРИЗИСА ТЕПЛООБМЕНА ВТОРОГО РОДА
ПРИ КИПЕНИИ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ Na_2SO_4**

Представлены результаты экспериментального исследования кризиса теплообмена второго рода при кипении растворов Na_2SO_4 в вертикальной электрообогреваемой трубе диаметром 8 мм. Опыты проведены в диапазоне давлений $P=0,8-16$ МПа, массовой скорости $w=100-1500$ кг/(м²·с), плотности теплового потока $q=0,44-2,25$ МВт/м² и концентраций растворов $S=0-50$ г/кг. Обнаружены области резкого уменьшения величины граничного паросодержания при определенных сочетаниях давления и концентрации растворов. Обоснована гипотеза, связывающая указанные особенности с ухудшением массообмена в двухфазном потоке при сверхкритическом солесодержании. Предложена эмпирическая зависимость для определения граничных паросодержаний в исследованном диапазоне режимных параметров и солесодержаний растворов Na_2SO_4 .

В ряде отраслей промышленности необходимо обеспечить надежную работу парогенераторов на воде повышенной минерализации. Одним из условий надежной работы теплонапряженных парогенерирующих поверхностей является предотвращение ухудшенных режимов теплоотдачи, связанных с кризисом теплообмена. Однако закономерности этого явления, особенно при повышенной минерализации воды и различном составе растворенных примесей, изучены далеко не полностью. Отсюда следует необходимость получения экспериментальных данных по кризису теплообмена растворов различных веществ и поиска общих закономерностей этого явления. Ранее такие данные получены в [1] для растворов NaCl и умягченной морской воды. Было установлено, что влияние поваренной соли на условия возникновения кризиса теплообмена может быть существенным, начиная с малых концентраций, порядка 0,5–4 г/кг. В [1] предложена гипотеза, объясняющая обнаруженные особенности кризиса теплообмена растворов NaCl и морской воды образованием пены на границе раздела между пристенной пленкой жидкости и паровым ядром кольцевого двухфазного потока. Возможность распространения этой гипотезы на другие растворы нелетучих веществ, присутствующих в водной среде при генерации пара, требует экспериментального подтверждения.

В данной работе представлены результаты экспериментального исследования кризиса теплообмена при кипении водных растворов Na_2SO_4 . Опыты выполнены на циркуляционном стенде, описанном в [2], с вертикальным электрообогреваемым рабочим участком из нержавеющей трубы диаметром 8 и длиной 1200 мм. Выход на критический режим осуществлялся плавным повышением плотности теплового потока при неизменных величинах расхода, давления и энтальпии рабочей среды на входе в экспериментальный участок. Появление скачка температуры на стенке опытной трубы в момент кризиса теплообмена фиксировалось с помощью автоматического потенциометра типа ЭПП-09МЗ, включенного в цепь защиты. Экспериментальные данные получены в диапазоне давлений 0,8–16 МПа, массовой скорости 100–1500 кг/(м²·с), плотности теплового потока 0,44–2,25 МВт/м² и концентраций растворов — 0–50 г/кг. Для приготовления растворов использовался сернокислый натрий квалификации «х. ч.». Величины граничных паросодержаний $x_{г,р}^0$ в опытах с дистиллятом ($S=0$) отличаются от значений, рассчитанных по эмпирической формуле Дорощука [3], не более чем на 0,05–0,08.

В опытах с растворами Na_2SO_4 критические условия анализировались

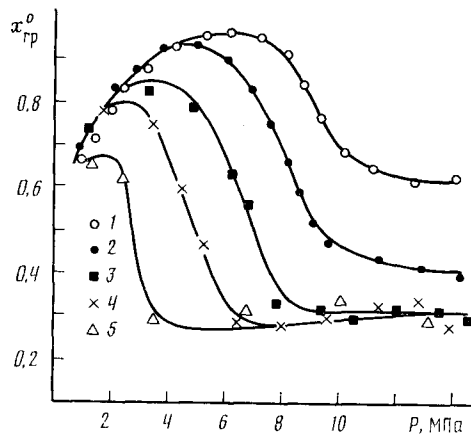


Рис. 1

Рис. 1. Экспериментальные зависимости $x_{гр}^0=f(P)$ в опытах с дистиллятом (1) и растворами Na_2SO_4 (2-5) при $\rho\omega=700 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$: 1 - концентрация Na_2SO_4 $S=0$; 2 - 0,2 г/кг; 3 - 1,5; 4 - 3,5; 5 - 10,0

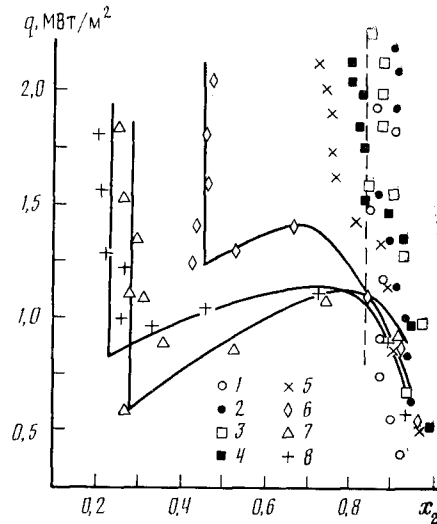


Рис. 2

Рис. 2. Сопоставление зависимостей $q=f(x_2)$ для дистиллята (1), докритических (2-5) и закритических (6-8) концентраций растворов Na_2SO_4 при $P=2,9 \text{ МПа}$, $\rho\omega=700 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$: 1 - концентрация Na_2SO_4 $S=0$; 2 - 0,2 г/кг; 3 - 0,5; 4 - 1,5; 5 - 3,5; 6 - 5,0; 7 - 10,0; 8 - 50,0

по полученным зависимостям выходного паросодержания x_2 от плотности теплового потока q и давления P при массовой скорости $\rho\omega=700 \text{ кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$, а также по зависимостям $x_2=f(\rho\omega)$ при $P=2,9$ и $9,8 \text{ МПа}$. Зависимости выходного паросодержания от давления и массовой скорости получены при одинаковой величине недогрева на входе в рабочий участок $\sim 10-15^\circ \text{С}$. Соответствующие этой величине недогрева опытные данные ложатся на вертикальные участки зависимостей $q=f(x_2)$. Поэтому можно утверждать, что зависимости $x_2=f(P)$ и $x_2=f(\rho\omega)$ получены при значениях $x_2=x_{гр}^0$, отвечающих кризису теплообмена второго рода.

Из представленных на рис. 1 опытных данных видно, что присутствие растворенного в воде сульфата натрия приводит к существенным изменениям зависимостей $x_{гр}^0=f(P)$. Каждую кривую, отвечающую одной концентрации Na_2SO_4 , можно в зависимости от давления разбить на три области: докритическую, в которой значения $x_{гр}^0$ для растворов Na_2SO_4 и воды близки между собой; критическую или переходную область, в которой наблюдается резкое уменьшение величины $x_{гр}^0$ при незначительном росте давления; закритическую, в которой $x_{гр}^0$ слабо зависит от давления и концентрации.

Из рис. 1 также следует, что при каждом давлении можно выделить две группы опытных точек, одна из которых отвечает докритической области концентраций с близкими к дистилляту значениями $x_{гр}^0$, а другая - закритической области с резко отличающимися от дистиллята значениями $x_{гр}^0$. Зоны перехода от одной области к другой, изображаемые на рис. 1 ниспадающими участками кривых, соответствуют критическим концентрациям. Предполагается, что при критической (переходной) концентрации происходит интенсивное вспенивание кипящей жидкости, ухудшающее массообмен в двухфазном потоке. Как видно из рис. 1, наибольшая разница в значениях $x_{гр}^0$ для воды и растворов наблюдается при средних значениях давлений. Так, например, при $P=6,0 \text{ МПа}$ для растворов Na_2SO_4 с $S=10 \text{ г}/\text{кг}$ граничное паросодержание $x_{гр}^0=0,26$, что меньше соответствующего значения для воды в 3,7 раза. Авторами была предпринята попытка описать эти изменения на основе теоретической модели Дорощука для кризиса теплообмена второго рода. В [3] для определения $x_{гр}^0$ пред-

Таблица 1

Влияние концентрации Na_2SO_4 на теплофизические свойства и $x_{\text{гр}}^0$,
 рассчитанное по (1) для $P=6,0$ МПа и $\rho\omega=700$ кг/(м²·с)

S , г/кг	0	10	50	100
ρ' , кг/м ³	761	772	850	870
$\sigma \cdot 10^3$, Н/м	20,1	22,7	23,8	25,2
$\nu' \cdot 10^6$, м ² /с	0,132	0,129	0,137	0,155
$x_{\text{гр}}^0$	0,81	0,86	0,84	0,80

ложена следующая зависимость:

$$(x_{\text{гр}}^0)^2 \rho\omega \frac{\nu'}{\sigma} \left(\frac{\rho'}{\rho''} \right)^{0,5} = \text{const}, \quad (1)$$

где ν' , σ , ρ' — соответственно коэффициент кинематической вязкости, коэффициент поверхностного натяжения и плотность жидкой фазы на линии насыщения; ρ'' — плотность пара. Для трубы диаметром 8 мм величина постоянной в правой части (1), согласно [3], может быть принята равной 0,015. Данные по теплофизическим свойствам воды и растворов Na_2SO_4 определялись согласно [4–7]. Результаты расчетов величины $x_{\text{гр}}^0$ по уравнению (1) для воды и растворов Na_2SO_4 приведены в табл. 1. Из представленных в ней данных видно, что отличия в расчетных значениях $x_{\text{гр}}^0$ для воды и растворов существенно меньше, чем в проведенных экспериментах.

Таким образом, резкое уменьшение величины $x_{\text{гр}}^0$ с ростом S нельзя объяснить изменением теплофизических свойств растворов Na_2SO_4 .

Существенная разница в абсолютных значениях $x_{\text{гр}}^0$ для воды и растворов Na_2SO_4 хорошо видна из экспериментальных зависимостей $q=f(x_2)$, представленных на рис. 2. Из этого рисунка следует, что величины $x_{\text{гр}}^0$ для дистиллята и растворов Na_2SO_4 с концентрацией $S \leq 3,5$ г/кг группируются с небольшим разбросом вокруг прямой, соответствующей $x_{\text{гр}}^0$ для чистой воды по данным [3]. В то же время для более высоких концентраций ($S=5$; 10 и 50 г/кг) значения $x_{\text{гр}}^0$ оказываются существенно меньшими. Вероятно, что величины $x_{\text{гр}}^0$ при $S \leq 3,5$ г/кг принадлежат докритической области концентраций, а значения $x_{\text{гр}}^0$ при $S=5$; 10 и 50 г/кг — закритической. Для растворов солей в закритической области концентраций следует также отметить появление наклонной ветви (рис. 2) в той части зависимостей $q=f(x_2)$, которые соответствуют подаче на вход среды с положительным массовым паросодержанием, т. е. при $x_1 > 0$. Характер зависимостей $q=f(x_2)$ при $x_1 > 0$ можно объяснить влиянием скорости парового ядра потока на толщину формируемой на входе в канал пристенной пленки жидкости. На рис. 3 опытные данные обработаны в виде зависимостей выходного паросодержания x_2 от входного x_1 . Из этого рисунка видно, что при закритических концентрациях растворов ($S=5$; 10 и 50 г/кг) опытные данные четко ложатся на горизонтальные и наклонные участки, пересекающиеся при $x_1=0$. В то же время для дистиллята и раствора с концентрацией $S=0,2$ г/кг, докритической для данного давления, точки излома горизонтальных и наклонных участков наблюдаются при $x_1 \gg 0$. В соответствии с концепцией кризисов теплообмена второго рода можно предположить, что точки излома зависимостей $x_2=f(x_1)$ во всех случаях отвечают началу ухудшенного массообмена в двухфазном потоке, хотя причины этого ухудшения для чистой воды и растворов до- и закритического солесодержания различны. Для дистиллята эта причина, согласно [8], заключается в переходе к чисто дисперсному режиму двухфазного течения с неорошаемой микропленкой, который наблюдается при массовых паросодержаниях $x \geq x_{\Delta p}$. Величина $x_{\Delta p}$ не постоянна и зависит от режимных параметров. Для растворов закритического солесодержания с уче-

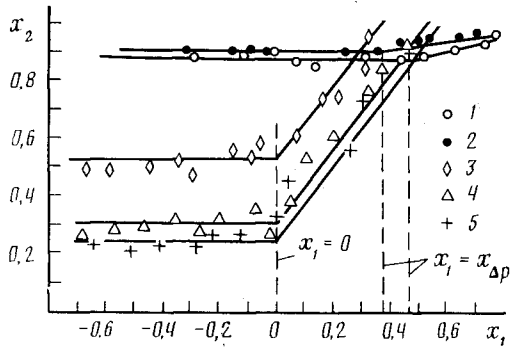


Рис. 3

Рис. 3. Сравнение зависимостей $x_2=f(x_1)$ для дистиллята (1) и растворов Na_2SO_4 докритической (2) и закритической (3-5) концентраций при $P=2,9$ МПа: 1 - концентрация Na_2SO_4 $S=0$; 2 - 0,2 г/кг; 3 - 5,0; 4 - 10,0; 5 - 50,0

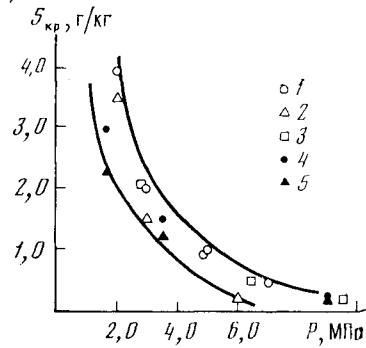


Рис. 4

Рис. 4. Сопоставление величин критического солесодержания в опытах по кризису теплообмена (1-3) и уносу влаги при барботаже (4, 5): 1, 4 - NaCl ; 2, 5 - Na_2SO_4 ; 3 - трилон Б

том [1] характерным является то, что независимо от типа растворенного вещества и его концентрации точка начала ухудшенного массообмена отвечает условию $x_1 \approx 0$. Поскольку в этом случае ухудшение массообмена связывается с пенообразованием, то естественно предположить, что точка $x_1 \approx 0$ соответствует началу этого процесса. Действительно, одним из условий образования пены является наличие свободной поверхности раздела фаз. При кипении в большом объеме такой поверхностью является зеркало испарения. При кипении в каналах эту роль выполняет поверхность пристенной пленки жидкости, которая впервые образуется при снарядном режиме течения, т. е., согласно [9], при массовых паросодержаниях $x < 0,05$. величиной, определяющей особенности кризиса теплообмена растворов солей при данном давлении, является критическое солесодержание $S_{кр}$. В [10] приводятся величины критических солесодержаний для растворов различных солей в зависимости от давления, определенные при изучении влияния состава котловой воды на унос влаги при барботаже. При этом отмечается, что ухудшение качества пара при $S > S_{кр}$ связано со вспениванием котловой воды. Сравнение величин $S_{кр}$, определенных по началу резкого изменения в зависимостях нагрузки объема парового пространства от солесодержания котловой воды, со значениями $S_{кр}$, определенными аналогичным образом по кривым наших зависимостей $x_{гр}^0 = f(P)$, приведено на рис. 4. Здесь изображены также экспериментальные точки, полученные в опытах по кризису теплообмена растворов трилона Б. Несмотря на оценочный характер подобного сравнения, видно, что экспериментальные точки хорошо укладываются в небольшом интервале между двумя граничными кривыми. Это обстоятельство позволяет ориентировочно оценивать величины критических концентраций для неисследованных растворов и прогнозировать степень отклонения величин $x_{гр}^0$ от стандартных данных для воды.

Для растворов Na_2SO_4 величину $x_{гр}^0$ при $\rho\omega = 700$ кг/(м²·с) можно рассчитывать по предлагаемой эмпирической зависимости

$$x_{гр}^0 = a_0 + a_1 P + a_2 P^2 + a_3 P^3, \quad (2)$$

где P — давление, МПа. Значения коэффициентов a_i для различных концентраций растворов Na_2SO_4 , рассчитанных с помощью ЭВМ по методу наименьших квадратов, приведены в табл. 2.

В исследованном диапазоне давлений отклонения значений $x_{гр}^0$, вычисленных по формуле (2), от экспериментальных данных не превышает $\pm 0,1$.

Таблица 2

$S, \text{ г/кг}$	a_0	a_1	$a_2 \cdot 10$	$a_3 \cdot 10^2$
0	0,427	0,240	-0,320	0,113
0,2	0,394	0,287	-0,455	0,180
1,5	0,598	0,167	-0,360	0,164
3,5	0,948	-0,095	-0,003	0,029
10,0	0,979	-0,254	0,279	0,095

Влияние массовой скорости может быть учтено с помощью следующего множителя в выражении:

$$x_{\text{гp}}^0 = (x_{\text{гp}}^0)_{\rho\omega=700} (\rho\omega/700)^k, \quad (3)$$

где $\rho\omega$ — массовая скорость, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $k = -0,8$ при $S > S_{\text{кр}}$, $k = -0,5$ при $S < S_{\text{кр}}$. Величина $(x_{\text{гp}}^0)_{\rho\omega=700}$ вычисляется по формуле (2). При $S = S_{\text{кр}}$ показатель степени k в формуле (3) можно приближенно принимать равным $-0,65$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Юсуфова В. Д., Бронштейн А. И. // Теплоэнергетика. 1975. № 10. С. 75.
2. Бронштейн А. И., Мирзоева Н. Г. // Теплоэнергетика. 1985. № 3. С. 46.
3. Дорощук В. Е., Левитан Л. Л., Ланцман Ф. П. // В кн.: Кризисы теплообмена и околокритическая область. Л.: Наука, 1977. С. 5.
4. Ривкин С. Л., Александров А. А. Теплофизические свойства воды и водяного пара. М.: Энергия, 1980. 424 с.
5. Пепинов Р. И., Лобкова Н. В., Зограббекова Г. Ю. // ТВТ. 1985. Т. 23. № 2. С. 399.
6. Юсуфова В. Д., Пепинов Р. И., Лобкова Н. В., Панахов И. А. // ТВТ. 1978. Т. 16. № 5. С. 960.
7. Пепинов Р. И. // II Всес. НТС: Использование морских и солоноватых вод на ТЭС и задачи научных исследований. Баку: Элм, 1976. С. 49.
8. Дорощук В. Е. Кризисы теплообмена при кипении воды в трубах. М.: Энергоатомиздат, 1983. 119 с.
9. Хьюитт Дж., Холл-Тэйлор Н. Кольцевые двухфазные течения. М.: Энергия, 1974. 407 с.
10. Кутепов А. М., Стерман Л. С., Стюшин Н. Г. Гидродинамика и теплообмен при паробразовании. М.: Высшая школа, 1983. 447 с.

АзНИИЭнергетики

Поступила в редакцию
21.07.89