

ные из работы [1], соответствующие удельной мощности 3,8 *квт/л*.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о границах применимости уравнения (1), а также уравнения для роста движущегося пузырька пара, полученного в работе [2] и использованного при выводе формулы (1). Распределение пузырьков пара по размерам получили, предположив, что время пребывания

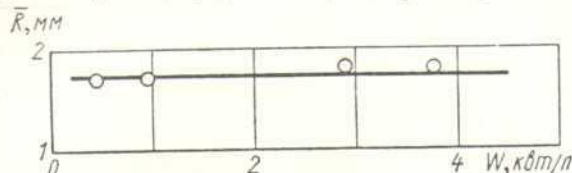


Рис. 2. Зависимость среднего радиуса пузырька пара от удельной мощности.

пузырька в жидкости не зависит от его возраста, т. е. от его размера. Кроме того, было принято, что закон роста движущегося пузырька, полученный для слабого кипения, справедлив и при интенсивном кипении.

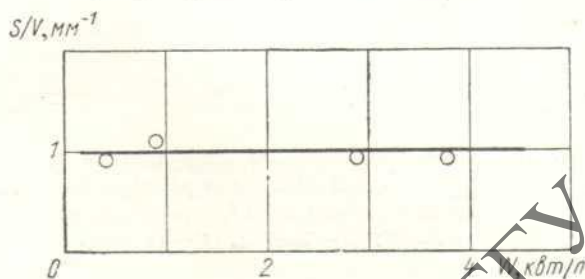


Рис. 3. Зависимость отношения суммарной поверхности раздела фаз к суммарному объему пара от удельной мощности.

Очевидно, что предположение о независимости времени пребывания пузырька в жидкости от его возраста наиболее строго выполняется при интенсивном кипении, так как при сильном перемешивании жидкости все пузырьки независимо от их размеров будут одинаково увлекаться жидкостью и покидать ее с равной

вероятностью. Закон роста движущегося пузырька в этом случае может оказаться иным вследствие того, что при большой концентрации пузырьков условия обтекания их жидкостью, а следовательно, и условия их роста могут измениться. Однако согласно уравнения (1) с результатами эксперимента, по-видимому, свидетельствует о применимости закона роста движущегося пузырька во всей области исследованных мощностей кипения.

Напротив, при слабом кипении более строго выполняется принятый закон роста пузырька. Но в связи с тем, что пузырьки различного радиуса всплывают в неподвижной жидкости, вообще говоря, с разной скоростью, время их пребывания в слабо перемешиваемой жидкости зависит от их возраста. Поэтому можно было бы ожидать существенное изменение вида функции (1). Однако опыт показывает, что этого не происходит. Сохранение вида этой функции, по-видимому, можно объяснить тем, что скорость всплывания большинства пузырьков изменялась в небольших пределах. Так, например, около 70% всех сфотографированных пузырьков имел размер 2—10 *мм*. Такие пузырьки всплывают в жидкости со скоростью, изменяющейся приблизительно от 20 до 25 *см/сек* [3]. Кроме того, в наших опытах все пузырьки пара образовывались в одной плоскости и должны были пройти одинаковый путь, прежде чем выйти из жидкости (как отмечалось в работе [4], такая схема опыта имеет определенный практический интерес). Следует учитывать также, что даже при слабом кипении жидкость перемешивается и в известной степени увлекает пузырьки (особенно мелкие), скорость всплывания которых мала.

Наши опыты были проведены при атмосферном давлении, и поэтому интервал паросодержаний, соответствующий изученному интервалу мощностей, включает в себя почти все имеющие практическое значение величины паросодержания кипящего водяного замедлителя в ядерных реакторах.

Поступило в Редакцию 26/IV 1963 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Завойский. «Атомная энергия», 10, 521 (1961).
2. В. К. Завойский. Там же, 10, 272 (1961).
3. D. Kreyelen, P. Noijtizen. Chem. Engng Progr., 46, 29 (1950).
4. В. К. Завойский. «Атомная энергия», 10, 381 (1961).

УДК 661.651/.52 : 621.039.524.4

Поведение боратов и борной кислоты в кипящих реакторах

Д. Г. Цхвирашвили, В. В. Галушташвили

В системах аварийной защиты ряда кипящих реакторов применяются борная кислота, пентабораты аммония и натрия. Имеется потенциальная возможность осуществления жидкостной системы регулирования реакторов, поэтому поведение боратов и борной кислоты в жидкой и паровой фазах воды представляет несомненный интерес.

Опыты по изучению распределения этих веществ между паром и водой проводились на лабораторной

установке типа испарителя [1]. Точность полученных результатов составляла 2—2,5%. В некоторых случаях она достигала 20%. Исследовался диапазон давлений 0,2—20 *Мн/м²*, представляющий практический интерес для кипящих реакторов и испарителей атомных электростанций.

В широких пределах изменялась также концентрация веществ в воде и показатель pH кипящей воды.

На рис. 1 представлены значения коэффициентов распределения боратов и борной кислоты в зависимости от отношения плотностей фаз воды. Эта зависимость описывается формулой

$$K_{\text{распр}} = \frac{c_{\text{п}}}{c_{\text{в}}} = \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{в}}} \right)^{0,9}, \quad (1)$$

где $c_{\text{п}}$ и $c_{\text{в}}$ — концентрация B_2O_3 в паре и воде, а $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{в}}$ — плотности пара и воды соответственно.

Совпадение $K_{\text{распр}}$ боратов и борной кислоты в области, где отсутствует влияние pH воды ($\text{pH} = 6 \div 8$),

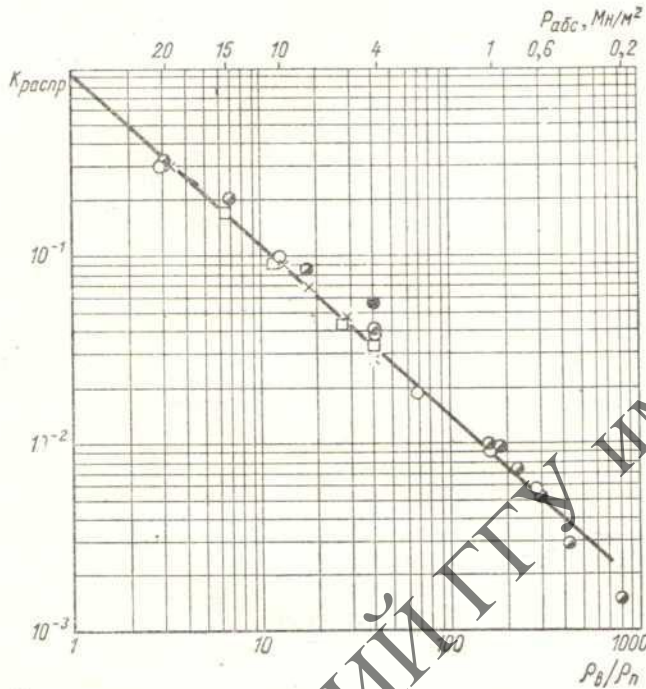


Рис. 1. Коэффициенты распределения боратов и борной кислоты в зависимости от отношения плотностей фаз воды:

○ — $\text{NH}_4\text{B}_5\text{O}_8$; × — $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$; ● — H_3BO_3 ; ● — H_3BO_3 [2]; □ — $\text{Na}_2\text{B}_5\text{O}_8$.

связано с гидролизом боратов до соответствующего иона с выделением борной кислоты. При указанных значениях pH воды ввиду незначительной диссоциации $K_{\text{распр}}$ борной кислоты ($K_{\text{распр}}^{\text{вид}} \approx K_{\text{распр}}^{\text{нд}} \approx K_{\text{распр}}$) практически определяется переходом в пар недиссоциированных молекул (рис. 2). По мере увеличения pH воды с уменьшением концентрации недиссоциированных молекул кислоты $K_{\text{распр}}$ уменьшается. Наконец, при полном подавлении гидролиза $K_{\text{распр}}^{\text{вид}}$ определяется переходом в пар соответствующих диссоциированных ионов ($K_{\text{распр}}^{\text{вид}} \approx K_{\text{распр}}^{\text{д}}$). Для описания указанного явления установлена зависимость $K_{\text{распр}}^{\text{вид}}$ борной кислоты от степени диссоциации, определяемой величиной pH воды:

$$K_{\text{распр}}^{\text{вид}} = \beta K_{\text{распр}}^{\text{нд}} + (1 - \beta) K_{\text{распр}}^{\text{д}}, \quad (2)$$

где $K_{\text{распр}}^{\text{нд}}$ — коэффициент распределения недиссоциированных молекул борной кислоты; $K_{\text{распр}}^{\text{д}}$ — коэффициент распределения диссоциированных ионов и β — степень гидролиза данной соли. На рис. 2 нанесена также расчетная кривая, которая хорошо совпадает с экспериментальными точками.

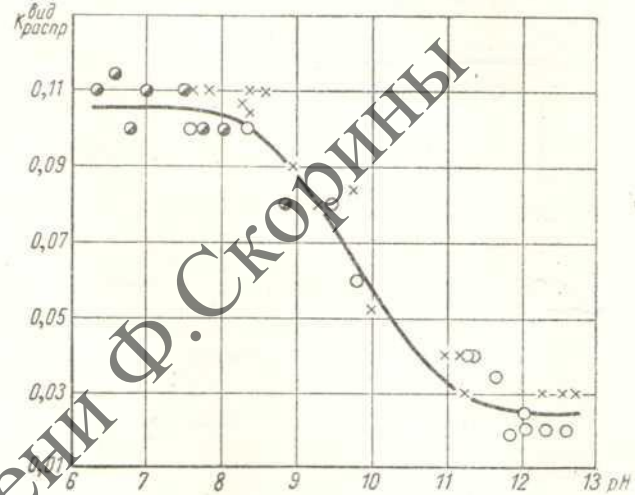


Рис. 2. Зависимость видимого коэффициента распределения $K_{\text{распр}}^{\text{вид}}$ борной кислоты от pH воды при избыточном давлении $P_{\text{изб}} = 10 \text{ Мн/м}^2$. В воду добавлялось: × — NaOH; ○ — Na_3PO_4 ; ● — $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

В табл. 1 приведены необходимые для решения уравнения (2) значения $K_{\text{распр}}^{\text{нд}}$ и $K_{\text{распр}}^{\text{д}}$, полученные экспериментально, и соответствующие расчетные константы диссоциации борной кислоты ($K_{\text{к}}$).

Таблица 1

$K_{\text{распр}}$ и расчетные константы диссоциации борной кислоты

$P_{\text{изб}}, \text{Мн/м}^2$	$K_{\text{распр}}^{\text{нд}}$	$K_{\text{распр}}^{\text{д}}$	$K_{\text{к}}$
4	0,038	0,008	$4,0 \cdot 10^{-9}$
10	0,110	0,030	$3,2 \cdot 10^{-9}$
15	0,200	0,030	$3,2 \cdot 10^{-9}$
20	0,300	0,095	$1,1 \cdot 10^{-9}$

Степень гидролиза данной соли β рассчитывается на основании существующих физико-химических данных.

Указанные зависимости описывают процесс перехода в пар боратов и борной кислоты. Несколько своеобразно поведение пентабората аммония, что связано с особенностями гидролиза боратов аммония в водном растворе. В этом случае по мере выделения из воды аммиака оставшаяся борная кислота переходит в паровую фазу. Поэтому свежеприготовленный реактив в области низких давлений ($1-3 \text{ Мн/м}^2$) позволил

установить зависимость $K_{распр}$ от времени. Значение $K_{распр}$ достигало стабильного значения (см. рис. 1) через 6 ч при давлении 1 $Мн/м^2$ и через 3 ч при 3 $Мн/м^2$. Естественно, что при высоких давлениях (температурах) указанный процесс протекал почти мгновенно.

Специальными опытами установлено, что ряд веществ, присутствующих в воде ($NaCl$, Na_2SO_4), и основной продукт коррозии конструкционных материалов — окислы железа не влияют на значения $K_{распр}$. Характер изменения этих коэффициентов (см. рис. 2) практически не зависит и от метода создания рН воды. Удовлетворительное совпадение величины $K_{распр}$ борной кислоты, полученное на действующем реакторе ЕВВР [2], с нашими экспериментальными данными приводит к предположению, что наличие потока нейтронов также не влияет сколько-нибудь существенно на процесс перехода боратов и борной кислоты в пар.

Таким образом, полученные данные могут быть использованы при решении практических задач, связанных с проектированием и эксплуатацией атомных электростанций. Однако зависимость $K_{распр}^{вид} = f(pH)$ справедлива только при устойчивых анионах. В области существования неустойчивых форм или при переходе одних анионов в другие наблюдается либо резкое изменение $K_{распр}$ при определенных рН, либо значительный разброс значений этих коэффициентов. Такая область оказалась при давлениях ниже $P_{изб} = 2 \text{ Мн/м}^2$.

Таблица 2

$K_{распр}$ борной кислоты при различных рН воды (%)

$P_{изб},$ $Мн/м^2$	рН				
	8	9	10	11	12
1,5	1,60— 0,70	1,60— 0,20	0,45— 0,10	0,26— 0,10	0,11
1,0	9,00—	9,00— 0,20	9,00— 0,16	0,05	0,03
0,5	0,60— 0,12	0,58— 0,03	0,40— 0,03	0,17— 0,03	0,04
0,1	0,11	0,11— 0,04	0,04	0,04	0,04

В табл. 2 приводятся $K_{распр}$ борной кислоты (в процентах) и разброс их значений. Указанные положения согласуются с особенностями поведения боратов в водном паровом [3].

При давлениях пара $P_{изб} = 2 \div 20 \text{ Мн/м}^2$ в воде устойчиво находятся соответствующие анионы. Для этой области зависимость $K_{распр}^{вид}$ от давления и величины рН приведена на рис. 3.

Результаты исследования позволяют рассчитывать баланс боратов и борной кислоты в теплоносителе атомных электростанций. Он полностью определяется растворимостью этих веществ в воде и водяном паре. Последняя даже при давлении 0,1 $Мн/м^2$ во много раз превышает обычные значения механического уноса влаги паром. При выводе боратов и борной кислоты из теплоносителя реактора продувкой через испари-

тели можно уменьшить концентрацию этих веществ путем увеличения рН воды. Только при давлении 0,1 $Мн/м^2$ указанный способ не даст практически ощутимого результата, но в этой области коэффициент выноса вообще невелик. При давлении 1 $Мн/м^2$ достаточно увеличить рН до 10. В некоторых условиях (0,5 и 1,5 $Мн/м^2$) достигнуть такого эффекта можно лишь при значительном подщелачивании воды (рН \approx 12). Это позволяет судить и об оптимальной области давлений в испарителях. Закономерности поведения борной кислоты [4] и боратов в перегретом паре приводят к убеждению, что они не будут отлагаться ни в пароперегревателях атомных электростанций с прямым

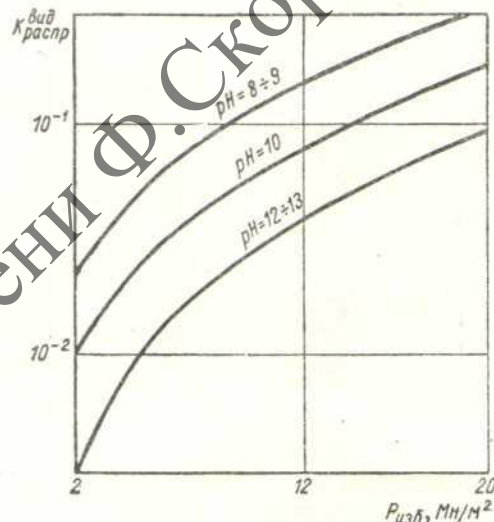


Рис. 3. Зависимость $K_{распр}$ борной кислоты от давления и рН воды.

циклом, ни в турбинах. На это указывает и опыт работы итальянской геотермальной станции, где слабо перегретый пар с большим содержанием борной кислоты направляется в турбину [5]. В области образования влаги борная кислота и, по-видимому, бораты из-за большой растворимости в воде [3] будут ею смываться. То, что эти вещества не будут отлагаться в паровом и водяном трактах, указывает на безопасность их применения на атомных электростанциях.

Поступило в Редакцию 6/IV 1963 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Д. Г. Ц х в и р а ш в и л и. «Труды Института энергетики АН ГрузССР», XVI, 63 (1962).
2. Э. У. К р а м е р. Ядерные реакторы с кипящей водой. М., Изд-во иностр. лит., 1960.
3. Г. В. С а м с о н о в и д р. Бор, его соединения и сплавы. Киев, Изд-во АН УССР, 1960.
4. Д. Г. Ц х в и р а ш в и л и, Д. П. Н е б и е р и д з е. «Труды Института энергетики АН ГрузССР», XIV, 173 (1961).
5. Rev. gén. élect., 64, 373 (1955).