

2) для каждой ячейки определяются $F_{яч}$, $d_{яч}$, $K_{яч}$ по формулам (14), (5), (6); $\beta_{яч}$ по формуле (8) и $(\lambda/\lambda_{Бл})_{яч}$ по формуле (17);

3) по формуле (4) находится $(\lambda/\lambda_{Бл})_к$;

4) коэффициент гидравлического сопротивления канала рассчитывается по формуле Блазиуса с использованием $d_{яч}$ и умножается на поправочный множитель $(\lambda/\lambda_{Бл})_к$.

Описанным методом были рассчитаны гидравлические сопротивления каналов, для которых имелись экспериментальные данные. В табл. 2 сравниваются расчетные и экспериментальные значения отношений $\lambda/\lambda_{Бл}$ для «правильных» каналов $[(\lambda/\lambda_{Бл})_к = (\lambda/\lambda_{Бл})_{яч}]$. Для неограниченной плоской щели отношение $(\lambda/\lambda_{Бл})_{яч}$ вычислялось с использованием распределения скорости для плоской стенки (14); параметр $K_{яч}$ условно был принят равным нулю. В табл. 3 приведены данные для «неправильных» каналов. Расчетные значения отличаются от экспериментальных не более чем на 10%.

В заключение следует заметить, что точность метода определяется также тем, насколько точно среднегеометрическая линия совпадает с действительной ЛМС. Учитывая это положение, описанный метод расчета коэффициентов сопротивления следует рекомендовать для каналов, у которых абсолютное значение разности параметров $\beta_{яч}$ всех противолежащих ячеек (соприкасающихся по среднегеометрической линии, выбранной в качестве ЛМС) не превышает единицы. Этому условию, вытекающему из анализа экспериментальных данных о полях скоростей, удовлетворяют практически все используемые в теплоэнергетике сложные каналы, в частности каналы, формы которых приведены в табл. 3. Для концентрических кольцевых зазоров указанное условие выполняется в пре-

делах $\alpha = 1 \div 0,4$. Из работы [3] следует, что при $\alpha = 0,4$ отношение смещения ЛМС относительно среднегеометрической линии к ширине зазора составляет $\sim 15\%$. Коэффициент гидравлического сопротивления при $\alpha = 0,4$, рассчитанный по предлагаемой методике со среднегеометрической линией в качестве ЛМС, отличается от экспериментального значения на 4%, что находится в пределах точности расчета.

Поступила в Редакцию 3/IV 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. М. Х. Ибрагимов и др. «Атомная энергия», **21**, 101 (1966).
2. L. Clauser. *Advances Appl. Mech.*, **4**, 1 (1956).
3. J. Brighton, J. Jones. *Trans. ASME. Ser. D*, **86** (4), 835 (1964).
4. H. Leuthesser. *J. Hydraul. Div. Amer. Soc. Civil Engrs*, **89**, No. 3, 1 (1963).
5. Л. Шиллер. Движение жидкости в трубах. М.—Л., ОНТИ, 1936.
6. П. А. Ушаков и др. «Атомная энергия», **13**, 162 (1962).
7. D. Gunn, C. Darling. *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **41**, 163 (1963).
8. В. И. Субботин, П. А. Ушаков, Б. Н. Габрианович. «Атомная энергия», **9**, 308 (1960).
9. А. В. Шейнман. Гидравлическое сопротивление пучков стержней в осевом потоке жидкости. В сб. «Жидкие металлы». М., Атомиздат, 1967.
10. B. Le Tourneau, R. Grimbale, J. Zerbe. *Trans. ASME. Ser. C*, **79** (8), 1751 (1957).
11. М. Х. Ибрагимов, И. А. Исупов, В. И. Субботин. Расчет и экспериментальное исследование полей скорости в канале сложной формы. В сб. «Жидкие металлы». М., Атомиздат, 1967.
12. D. Hartnett et al. *Trans. ASME, Ser. C*, **84** (1), 101 (1962).
13. C. Cremers, E. Eckert. *Trans. ASME, Ser. E*, **29** (4), 3 (1962).
14. L. Carlson, T. Irvin. *Trans. ASME, Ser. C*, **83** (4), 441 (1961).

Радиоактивность теплоносителя кипящего реактора ВК-50

О. И. МАРТЫНОВА, А. И. НАЗАРОВ, Ю. В. ЧЕЧЕТКИН,
Е. К. ЯКШИН, И. Г. КОБЗАРЬ

УДК 621.039.553.3

Одним из основных вопросов, связанных с применением одноконтурных АЭС, является распределение активности по контуру установи.

Известно, что в кипящих реакторах в результате парообразования происходит частичная очистка теплоносителя от продуктов коррозии и растворенных солей, что обеспечивает низкую активность паро-конденсатной части

контура при остановке реактора. Однако с повышением давления в контуре это преимущество уменьшается.

В общем виде суммарная активность насыщенного пара определяется выражением

$$A_n = \sum_1^m A_{BK} \gamma_K + \sum_1^f A_{Bj} \beta_j + \sum_1^n A_{Bi} (K_{pi}^B + W). \quad (1)$$

Первый член уравнения оценивает активность теплоносителя за счет непосредственной активации ядер атомов теплоносителя.

Наиболее важными образующимися радиоактивными изотопами являются N^{13} , N^{16} , F^{18} . Активность N^{16} обычно определяет мощность дозы на поверхности паропроводов, сепараторов, турбины, конденсатора и эжектора при работе реактора. При удовлетворительном состоянии оболочек твэлов изотоп N^{13} определяет активность выхлопных газов эжектора конденсатора и, следовательно, активность основного газового выброса из установки. Изотоп F^{18} определяет активность конденсатора в течение времени от нескольких минут до нескольких часов после остановки реактора.

Второй член выражения (1) определяет активность газообразных осколков деления при разгерметизации твэлов. Вклад их в общую активность пара и последующую остаточную активность дочерних продуктов распада пароконденсатного тракта будет определяться степенью разгерметизации твэлов, степенью выгорания горючего и мощностью реактора. При значительной разгерметизации твэлов следует ожидать повышения активности в конденсатопитательном тракте контура. Третий член выражения (1) характеризует распределение активности в паровом тракте, которая в дальнейшем является определяющей в поверхностном загрязнении оборудования и технологических коммуникаций установки с кипящим реактором. Сюда относятся активность растворенных солей, вносимых в реактор с питательной водой, активность продуктов коррозии не газообразных осколков деления.

Для оценки активности пароконденсатного тракта АЭС с кипящими реакторами необходимо знать закономерности перехода в пар растворенных в воде продуктов деления и коррозии конструкционных материалов. Имеющиеся данные по выносу в пар соединений различных элементов были получены на испытательных стендах Московского энергетического института [1] и на реакторе ИРТ АН ГрузССР [2].

После ввода в действие установки ВК-50, относящейся к числу одноконтурных АЭС, исследования стали проводить на ней. Принципиальная схема установки первого периода работы с точками отбора проб показана на рис. 1.

Данные по распределению активности между фазами теплоносителя и по коэффициентам выноса активных продуктов коррозии получе-

ны за период эксплуатации реактора с декабря 1965 г. по апрель 1966 г. В табл. 1 и 2 приве-

Активность продуктов коррозии в воде реактора при номинальной тепловой мощности реактора Таблица 1

Изотоп	Активность *, кюри/кг
Cu^{64}	$(4,1 \div 6,5) \cdot 10^{-5}$
Mn^{56}	$(4,01 \div 5) \cdot 10^{-5}$
Zn^{65}	$(1,0 \div 4,1) \cdot 10^{-6}$
Co^{60}	до $6,4 \cdot 10^{-9}$
Fe^{59}	до $2,5 \cdot 10^{-9}$
Сухой остаток **	$(1,0 \div 1,9) \cdot 10^{-4}$

* Активность во время отбора пробы.

** Активность через 2 ч после отбора пробы.

Активность продуктов коррозии в паре * реактора при номинальной мощности Таблица 2

Изотоп	Активность **, кюри/кг
Cu^{64}	$(3,0 \div 4,0) \cdot 10^{-7}$
Mn^{56}	$(3,0 \div 3,6) \cdot 10^{-7}$
Zn^{65}	$(1,1 \div 8) \cdot 10^{-7}$
Co^{60}	до $2,1 \cdot 10^{-9}$
Fe^{59}	до $3,0 \cdot 10^{-10}$
Сухой остаток ***	$(0,3 \div 1,5) \cdot 10^{-6}$

* Отбор пробы перед сепаратором высокого давления.

** Активность во время отбора пробы.

*** Активность через 2 ч после отбора пробы.

дены данные по активности некоторых элементов при номинальной тепловой мощности аппарата, равной 145 Мвт, в воде реактора и паре.

К концу первого периода работы реактора активность воды по сухому остатку возросла в два раза.

Как известно [1, 3], загрязнение насыщенного водяного пара при кипении воды происходит двумя путями: 1) за счет механического уноса влаги, при этом загрязнение пара определяется величиной влажности пара и концентрацией примесей в воде; 2) за счет истинного растворения примесей в паре. В последнем случае коэффициент распределения определяется химической природой соеди-

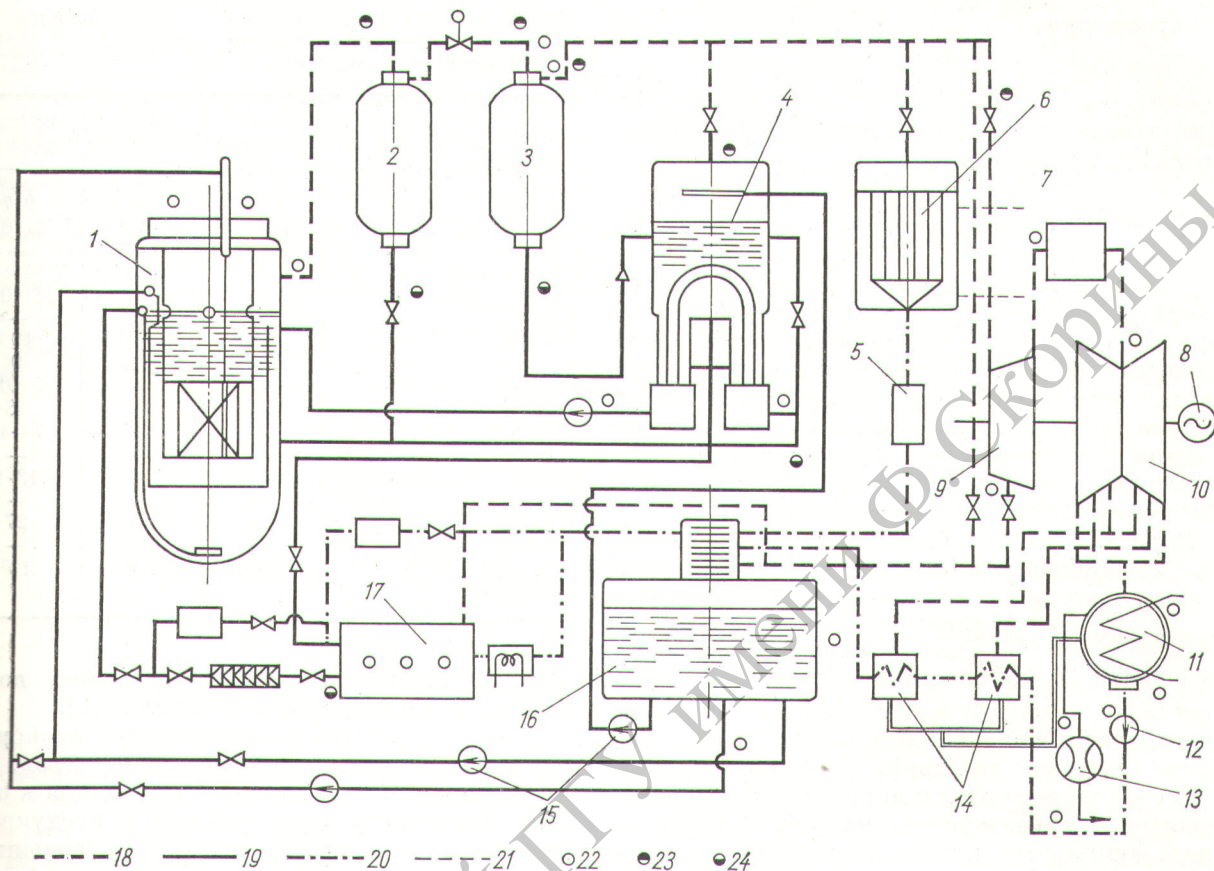


Рис. 1. Схема установки ВК-50 с точками отбора проб:

1 — реактор; 2, 3 — сепараторы высокого и низкого давления соответственно; 4 — парогенератор; 5 — доохладитель; 6 — вспомогательный конденсатор; 7 — сепаратор пара; 8 — генератор тока; 9, 10 — цилиндры высокого и низкого давления турбины; 11 — конденсатор; 12 — конденсатный насос; 13 — эжектор; 14 — подогреватели низкого давления; 15 — питательные насосы; 16 — деаэрактор; 17 — выпарная установка; 18 — трубопроводы для пара; 19 — трубопроводы питательной и реакторной воды; 20 — конденсат; 21 — техническая вода; 22 — точки радиационного контроля; 23 — точки отбора проб пара; 24 — точки отбора проб воды.

вения, его состоянием в растворе и давлением: то

$$C_{pi} = C_{vi} \left(\frac{\rho_{п}}{\rho_{в}} \right)_п. \quad (2)$$

Коэффициент выноса i -го компонента определяется отношением его суммарной концентрации в паре к суммарной концентрации в воде:

$$K_i^в = \frac{\sum C_{pi}}{\sum C_{vi}} = W + K_i^вд. \quad (3)$$

При $W = 0$ $K_i^в = K_i^вд$.

Для двухфазного состояния теплоносителя (вода + насыщенный пар) всегда справедливо равенство

$$K_{pi}^вд \leq K_{pi}.$$

Так как

$$K_{pi} = \frac{C_{pi}}{C_{vi}},$$

$$K_{pi}^вд = \frac{C_{pi}}{\sum C_{vi}},$$

$$\sum C_{vi} = C_{vi} + C_{vi}^{вз};$$

где

K_{pi} характеризует равновесие только между растворенными формами соединений. Следовательно, концентрация i -го изотопа в паре при данном давлении определяется концентрацией его в воде и коэффициентом выноса. Сравнение данных табл. 1 и 2 показывает влияние коэффициента выноса на изменение вклада в активность пара отдельных изотопов.

При определении коэффициентов распределения влажность пара реактора находилась

из отношения

$$\frac{A_{\text{пNa}}}{A_{\text{вNa}}} \quad (4)$$

При дальнейших расчетах величина $K_{\text{ip}}^{\text{вид}}$ определялась из выражения

$$K_{\text{ip}}^{\text{вид}} = \frac{A_{\text{пи}}}{A_{\text{ви}}} \quad (5)$$

Для продуктов коррозии Zn^{65} , Co^{60} , Fe^{59} коэффициенты очистки составили 9—45. Поэтому следует ожидать, что данные изотопы будут найдены в отложениях паровой и конденсатной частях установки. Было установлено, что основная активность в отложениях по коммуникациям и оборудованию установки обусловлена именно этими изотопами, причем на долю Zn^{65} приходится около 90% активности.

В табл. 3 для сравнения приведены данные по коэффициентам очистки различных изотопов, полученные на однотипных кипящих реакторах ($K_{\text{оч}} = \frac{\text{удельная активность воды}}{\text{удельная активность пара}}$). Из сравнения коэффициентов видно, что значения $K_{\text{р}}^{\text{вид}}$ для Cu^{64} и Fe^{59} близки к данным, полученным в МЭИ. Данные для Co^{60} лежат выше расчетных значений, полученных в МЭИ.

В связи с тем что при исследованиях не определялся тип соединения, на рис. 2 представлены суммарные данные по видимым коэффициентам распределения соединений изотопов (пунктирные линии). Сплошными линиями обо-

Коэффициенты очистки, полученные экспериментально на однотипных реакторах

Таблица 3

Изотоп	BORAX IV ($p=21 \text{ ату}$)	EBWR ($p=42 \text{ ату}$)	VBWR ($p=70 \text{ ату}$)	ВК-50 ($p=70 \text{ ату}$)
F18	—	4,33	—	9,7
Na ²⁴	$5 \cdot 10^3$	$3,2 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^3$
Cr ⁵¹	—	—	$1 \cdot 10^4$	—
Mn ⁵⁴	—	—	$7 \cdot 10^3$	—
Mn ⁵⁶	—	—	—	$4 \cdot 10^2$
Co ⁵⁸	—	$3,6 \cdot 10^3$	$3 \cdot 10^3$	—
Co ⁶⁰	—	—	—	19
Fe ⁵⁹	—	—	10^3	9
Cu ⁶⁴	—	—	—	$7 \cdot 10^2$
Zn ⁶⁵	—	—	—	45
Sr ^{89, 91}	$9,2+25$	—	—	$7-46$
Sr ⁹⁰	$420-484$	—	—	—
Mo ⁹⁹	$1,6 \cdot 10^4$	—	—	$1,13 \cdot 10^3$
J ¹³¹	$33-35$	—	—	—
Ba ¹⁴⁰	$36-63$	—	—	27
Cs ¹³⁷	$(5,8 \div 6) \cdot 10^2$	—	—	—
Сухой остаток	10^3-10^4	$4,9 \cdot 10^3$	10^4	10^3

значены коэффициенты распределения, полученные в лабораторных условиях [1].

С ростом давления вынос продуктов коррозии и деления в пар будет увеличиваться, что предъявляет дополнительные требования к очистке питательной воды реактора и предупреждению выхода в контур осколочных элементов. С ростом давления роль влажности в выносе активности снижается.

Коэффициенты распределения различных изотопов

Таблица 4

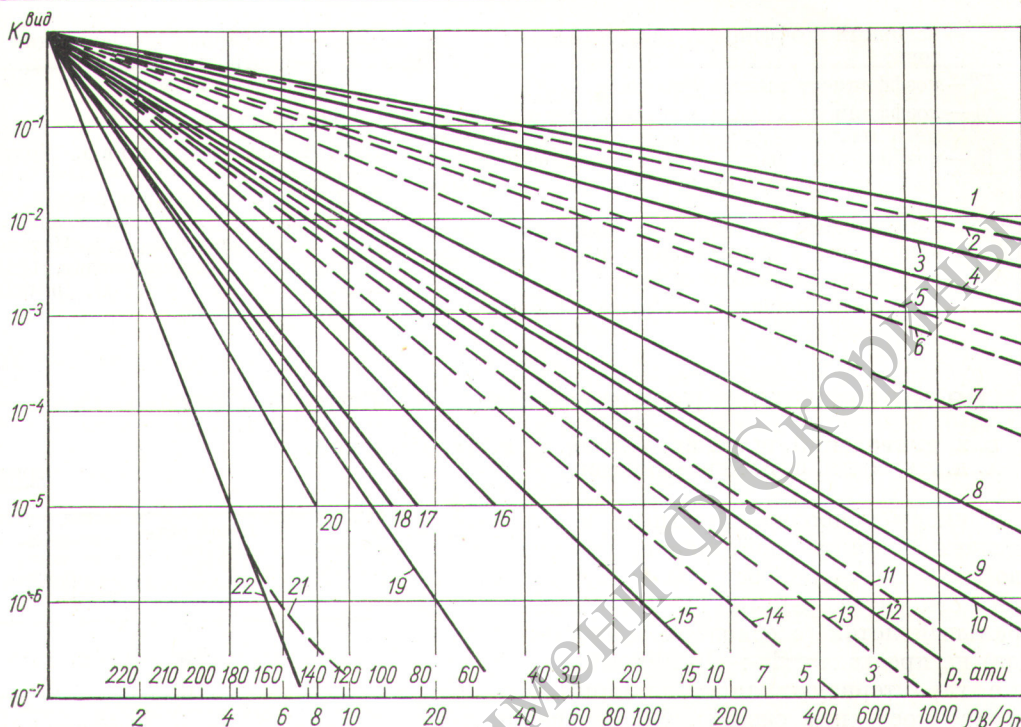
Изотопы	BORAX IV ($p=21 \text{ ату}$)	EBWR ($p=42 \text{ ату}$)	VBWR ($p=70 \text{ ату}$)	ВК-50 ($p=70 \text{ ату}$)		МЭИ	ИРТ АН ГрузССР
	K^B	K^B	K^B	K^B	$K_{\text{р}}^{\text{вид}} *$	$K_{\text{р}}$	$K_{\text{р}}$
F18	—	0,230	—	0,103	0,1025	—	—
Cu ⁶⁴	—	—	—	$1,43 \cdot 10^{-3}$	$0,93 \cdot 10^{-3}$	$3,44 \cdot 10^{-3}$	$1,62 \cdot 10^{-1}$
Mn ⁵⁶	—	—	—	$2,510^{-3}$	$2,05 \cdot 10^{-3}$	—	—
Mn ⁵⁴	—	—	$1,43 \cdot 10^{-4}$	—	—	—	—
Na ²⁴	$2 \cdot 10^{-4}$	$3,12 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	—	—	—
Zn ⁶⁵	—	—	—	$2,2 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	—	—
Co ⁶⁰	—	—	—	$5,18 \cdot 10^{-2}$	$5,13 \cdot 10^{-2}$	$2,51 \cdot 10^{-3} **$	$1,62 \cdot 10^{-1}$
Co ⁵⁸	—	$0,278 \cdot 10^{-3}$	$0,33 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	—
Fe ⁵⁹	—	—	$1 \cdot 10^{-3}$	$1,11 \cdot 10^{-1}$	$1,105 \cdot 10^{-1}$	$1,62 \cdot 10^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-1}$
Ba ¹⁴⁰	$(2,77 \div 1,59) \cdot 10^{-2}$	—	—	$3,72 \cdot 10^{-2}$	$3,67 \cdot 10^{-2}$	—	—
Sr ^{89, 91}	$(1,09 \div 4) \cdot 10^{-2}$	—	—	$2,17 \cdot 10^{-2}$	$2,12 \cdot 10^{-2}$	—	—
Sr ⁹⁹	$6,25 \cdot 10^{-5}$	—	—	$8,85 \cdot 10^{-4}$	$3,45 \cdot 10^{-4}$	—	—
Cs ¹³⁷	$1,7 \cdot 10^{-3}$	—	—	—	—	—	—
J ¹³¹	$2,9 \cdot 10^{-2}$	—	—	—	—	—	—
Cr ⁵¹	—	—	10^{-4}	—	—	—	—

* При влажности 0,054%.

** Расчетная величина.

Рис. 2. Видимые коэффициенты распределения соединений изотопов:

1 — Fe_2O_3 ; 2 — соединения Fe; 3 — Al_2O_3 ; 4 — B_2O_3 ; 5 — соединения Co^{60} ; 6 — соединения Ba; 7 — соединения Zn; 8 — H_2O ; 9 — CuO ; 10 — SiO_2 ; 11 — соединения Mn; 12 — BeO ; 13 — соединения Cu; 14 — соединения Mo; 15 — MgO ; 16 — LiCr ; 17 — NaOH ; 18 — NaCl ; 19 — $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_4](\text{OH})_2$; 20 — CaCl_2 ; 21 — Na_2SO_4 ; 22 — CaSO_4 .



В табл. 4 представлены коэффициенты распределения для различных установок [4], а так-

же данные, полученные в МЭИ [1] и на петле реактора ИРТ АН ГрузССР [2].

На рис. 3 приведены расчетные кривые изменения величины коэффициентов выноса для соединений кобальта и железа при различной влажности пара в зависимости от давления. За основу приняты видимые коэффициенты распределения, полученные на установке ВК-50.

Приведенные данные по активности реакторной воды и пара реактора ВК-50 и значения видимых коэффициентов распределения некоторых изотопов могут быть использованы для оценки поверхностной загрязненности оборудования и коммуникаций.

Поступила в Редакцию 23/I 1967 г.

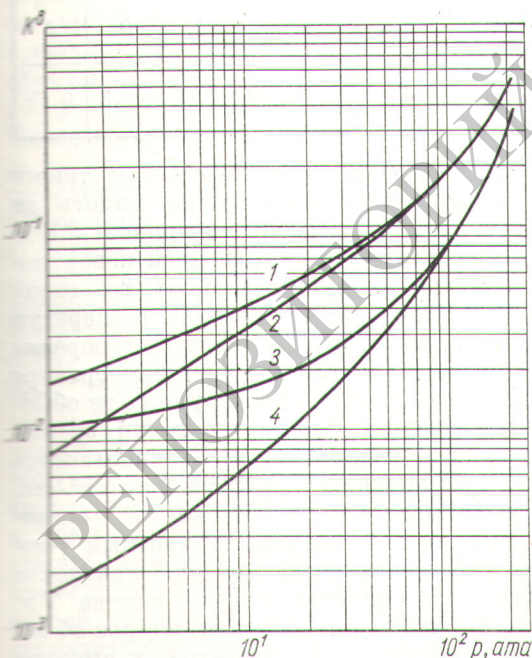


Рис. 3. Зависимость коэффициентов выноса от давления при влажности пара 0,1 и 1% для соединений:

1 — Fe при $W = 1\%$; 2 — Fe при $W = 0,1\%$;
3 — Co при $W = 1\%$; 4 — Co при $W = 0,1\%$.

Принятые обозначения

- A_{vi} — активность в воде i -го изотопа растворенных солей, продуктов коррозии и не газообразных продуктов деления;
- A_{vj} — активность в воде j -го изотопа радиоактивных газообразных осколков деления;
- A_{vk} — активность в воде k -го изотопа активируемого теплоносителя;
- A_{HNa} — активность Na^{24} в паре;
- A_{BNa} — активность Na^{24} в воде;
- W — влажность пара;
- A_{pi} — активность i -го изотопа в паре;
- $K_{pi}^{\text{вид}}$ — видимый коэффициент распределения i -го изотопа;

K_{pi} — истинный коэффициент распределения i -го изотопа;

K_i^B — коэффициент выноса i -го изотопа;

γ_k — коэффициент выхода k -го изотопа активируемого теплоносителя из воды в паровую фазу;

β_j — коэффициент выхода j -го изотопа радиоактивных осколочных газов из воды в паровую фазу;

C_{pi} — концентрация растворенных примесей в паре;

C_{vi} — концентрация растворенных примесей в воде;

$C_{vi}^{вз}$ — концентрация взвесей в воде;

ΣC_{pi} — суммарная концентрация примесей в паре;

ΣC_{vi} — суммарная концентрация примесей в воде;

ρ_p — плотность пара;

ρ_v — плотность воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. О. И. Мартынова. Докторская диссертация. М., 1963.
2. Д. Г. Цхвирашвили, Л. Е. Васадзе, А. С. Цух. «Атомная энергия», 21, 300 (1966).
3. Т. Х. Маргулова. Методы получения чистого пара. М., Госэнергоиздат, 1955.
4. F. Brutschy et al. Industr. and Engng Chem., 51, 1262 (1959).

О радиационном повреждении обычного бетона

В. Б. ДУБРОВСКИЙ, Ш. Ш. ИБРАГИМОВ, М. Я. КУЛАКОВСКИЙ,
А. Я. ЛАДЫГИН, Б. К. ПЕРГАМЕНЩИК

УДК 628.58+621.039.538.7

К числу наиболее известных работ, описывающих влияние нейтронного облучения на свойства цементов, бетонов и их заполнителей, относятся работы [1—3]. Однако интегральный поток (в основном тепловых нейтронов) не превышал $(1 \div 7) \cdot 10^{19}$ нейтр/см²; данные характеризуют лишь влияние облучения на прочность при сжатии. Об изменении других важных физико-технических характеристик бетонов и их составляющих, без которых невозможен расчет конструкции защиты (коэффициента температурного линейного расширения, коэффициента теплопроводности, модуля упругости и пр.), вообще не упоминается. В 1966 г. впервые были опубликованы отечественные результаты исследования радиационной стойкости обезвоженного жаропрочного хромитового бетона на портланд-цементе и жидком стекле, облученного потоком $(2 \div 2,3) \cdot 10^{21}$ нейтр/см² при температурах 200—600°С [4, 5]. Было отмечено снижение прочности на сжатие и модуля упругости; существенного изменения других свойств (плотности, теплопроводности, температурного расширения и пр.) обнаружено не было.

В настоящей работе изложены результаты исследования радиационной стойкости обычного бетона.

Термином «обычный бетон» характеризуют бетоны на портланд-цементе с заполнителями из нерудных материалов: известняков, песчаников, гранитов и т. п. Выбор заполнителя, как правило, определяется местом строительства. Для исследуемого бетона в качестве заполнителя принят песчаник.

Ниже приводится технологический и химический состав бетона (расход материалов в т/м³):

Портланд-цемент	Песок речной (кварцевый) крупностью 0,15—0,6 мм	Щебень-песчаник крупностью 5—10 мм	Вода затворения	Химически связанная вода
0,374	0,637	1,112	0,187	0,075

Объемный вес свежесушеного бетона составляет 2,310 т/м³. Химический состав (учтена вся вода затворения), вес. %:

H	Si	Ca	Mg	Fe	Al	O	S
0,86	32,2	8,4	0,12	2,09	1,17	49,3	0,19

В работе [6] показано, что бетон такого состава может быть использован вплоть до температур 300°С. Поток нейтронов $2,3 \times 10^{10}$ нейтр/см²·сек на внутренней поверхности монолитной бетонной защиты толщиной около 200 см приводит к перепаду температур 1,5°С [7]. Таким образом, допуская перепад температур в бетоне 250°С при температуре на поверхности 30—50°С, конструкцию из обычного бетона данного состава с точки зрения температурного режима можно использовать в потоках нейтронов до $3,8 \cdot 10^{12}$ нейтр/см²·сек, если тепловыделение в бетоне в основном обусловлено собственным захватным γ -излучением. Интегральный поток нейтронов за десять лет составит в этом случае 7×10^{20} нейтр/см². Таким образом, вопрос об использовании обычного железобетона в высоких потоках нейтронов может быть решен только после исследования его радиационной стойкости в потоках 10^{20} — 10^{21} нейтр/см².