

Р и с. 2. Отношение силы трения потока о жидкую пленку в рассматриваемой ячейке к силе трения в круглой трубе того же гидравлического диаметра при различных значениях относительного шага решетки  $H/R$

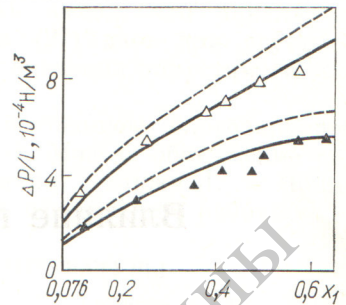
сечения ячейки  $D = 2\left(\sqrt{\frac{6}{\pi\sqrt{3}}H} - R\right)$ . Отношение значе-

ний силы, рассчитанных по выражениям (3) и (6) зависит только от  $b = H/R$  (рис. 2). При  $b$ , близком к 1, сила трения в формуле (6) значительно превышает силу трения, рассчитанную по уравнению (3). Отношения интенсивностей силового взаимодействия и уноса капель с пленки в пучках стержней к соответствующим значениям в круглых трубах [5] того же гидравлического диаметра (при тех же параметрах течения) совпадают (см. рис. 2). Интенсивность осаждения капель на стенку в каналах с пучками стержней и в круглой трубе мало различается [5].

В работе [6] эксперименты по перепаду давления проводили в необогреваемом канале с семистержневым пучком, моделирующим бесконечное число стержней (профилированный канал). Это уменьшило влияние потоков между ячейками на гидродинамическое сопротивление канала, поэтому эксперименты [6] были наиболее удобны для проверки найденных соотношений. Ячейки имели форму шестиугольников (см. рис. 1 с  $H = 7,5$ ;  $R = 6,5$  мм). Значение  $b$  равно 1,15. Из рис. 2 следует, что при этом значении  $b$  сила трения, рассчитанная по формуле (6), на 20% превышает силу, полученную с использованием выражения (3).

Для расчета перепадов давления численно решали уравнения (рис. 3) сохранения массы, импульса, энергии составляющих смеси [3], которые замыкались зависимостями для межфазных взаимодействий [5]. Диапазон приведенных результатов расчетов ( $0,075 < x_1 < 0,65$ ) определялся тем, что при больших  $x_1$  жидкая пленка оказывалась очень тонкой и разрушалась, поэтому модель дисперсно-кольцевого течения была неприменима (например, при

Р и с. 3. Зависимость  $\Delta P/L$  ( $L$  — длина канала) от паросодержания  $x_1$  и массового расхода теплоносителя  $G$  для пучка с относительным шагом  $H/R = 1,15$  ( $P = 40$  бар):  $\blacktriangle$  и  $\triangle$  — эксперимент при  $G$ , равном 870 и 1200  $\text{кг} \times \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ , — — — расчет с введенными межфазными взаимодействиями, — — — с взаимодействиями, полученными при непосредственном использовании формул для круглых труб



$G = 1200 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ ,  $x_1 = 0,6$ ,  $\delta = 11 \text{ мкм}$ ). При  $x_1 < 0,075$  ( $\alpha_1 \leq 0,75$ ) дисперсно-кольцевой режим течения так же невозможен. Из рис. 3 следует, что гидравлическое сопротивление «тесных» каналов с пучками стержней недостаточно хорошо описывается при непосредственном использовании межфазных взаимодействий, полученных для круглых труб. Использование изложенной методики учета особенностей геометрии проходного сечения канала для расчета межфазных взаимодействий позволяет получить хорошее согласие расчетных и экспериментальных значений гидравлического сопротивления тесных каналов с пучками стержней.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миронов Ю. В., Шпанский С. В. — Атомная энергия, 1975, т. 39, вып. 6, с. 403.
2. Whalley P. — Intern. J. Multiphas Flow, 1977, v. 3, N 6, p. 501.
3. Нигматулин Б. И. — Прикл. мат. и техн. физика, 1974, № 6, с. 141.
4. Нигматулин Б. И., Милашенко В. И., Николаев В. Е. — Теплофизика высоких температур, 1978, т. 16, вып. 6, с. 1258.
5. Крошилин А. Е., Крошилин В. Е., Нигматулин Б. И. — Прикл. мат. и техн. физика, 1981, № 4.
6. Боришанский В. М. и др. — В кн.: Достижения в области исследования теплообмена и гидравлики двухфазных потоков в элементах энергооборудования. Л., 1973, с. 144.

Поступило в Редакцию 04.04.80

УДК 621.039.76

## О сокращении выброса радиоактивных газов реактора ВВР-М в атмосферу

КОНОВАЛОВ Е. А., КОНОПЛЕВ К. А., ПИКУЛИК Р. Г., ПЛОЩАНСКИЙ Л. М., РАЗОВ Б. С., САЙГОВ Ю. П.

Исследования выброса радиоактивных продуктов в атмосферу реактора ВВР-М ЛИЯФ им. В. П. Константинова АН СССР [1] показали, что по всем идентифицированным радионуклидам сумма отношений мощности выброса каждого нуклида к его предельно допустимому выбросу, рассчитанному в соответствии с ПДВ-73 [2], находится в пределах 0,15—0,3 в зависимости от состояния реакторных систем и в основном определяется  $^{41}\text{Ag}$ . В это значение входит и третий, выброс которого ( $\sim 1 \text{ мКи/ч}$ ) в работе [1] не был приведен, так как он был идентифицирован позднее ( $1 \text{ Ки} = 3,700 \cdot 10^{10} \text{ Бк}$ ).

В связи с решением о модернизации ВВР-М для повышения его мощности с 16 до 30 МВт без существенного увеличения выброса радиоактивных веществ в атмосферу появилась необходимость исследовать возможности сокращения выброса на единицу мощности реактора. Использование известных способов такого сокращения рецирку-

ляционных систем и линий задержек на выходе системы вентиляции в виде лабиринтов воздухопроводов или газгольдеров требует значительных материальных затрат.

Поэтому исследования были направлены на разработку простых, эффективных и недорогих средств снижения выброса.

Основными источниками поступления  $^{41}\text{Ag}$  в систему вентиляции реактора являются воздушные полости тепловой колонны (60%) и горизонтальных экспериментальных каналов (30%). Герметизация таких воздушных полостей для сокращения выброса  $^{41}\text{Ag}$  ограничивает экспериментальные возможности исследовательского реактора, а иногда просто неприменима из-за сложности реализации на действующем реакторе. Более предпочтителен метод вытеснения или замещения воздуха в таких полостях, например, азотом [3]. К сожалению, для этой цели требуется не технический, а чистый азот, так как содержание



аргона в техническом азоте, поставляемом в баллонах, сравнимо с содержанием его в воздухе.

Нами был использован газ  $\text{CO}_2$ , поставляемый в баллонах. При активационном анализе этого газа установлено, что содержание аргона в нем на два порядка меньше, чем в воздухе. Экспериментальная проверка использования  $\text{CO}_2$  в качестве вытеснителя воздуха была проведена на частично герметизированной воздушной полости тепловой колонны, непосредственно примыкающей к отражателю активной зоны реактора. При объеме этой полости  $\sim 160$  л и расходе  $\text{CO}_2$  350 л/ч выброс  $^{41}\text{Ar}$  был сокращен на 36% общего выброса.

Следует отметить, что при использовании  $\text{CO}_2$  по сравнению с азотом сокращается на два порядка образование, а следовательно, и выброс долгоживущего  $^{14}\text{C}$ . Это обусловлено различием сечений образования  $^{14}\text{C}$  по реакциям:  $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$  ( $\sigma_a = 1,75$  б) и  $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$  ( $\sigma_a = 0,9 \cdot 10^{-3}$  б), а также малым содержанием азота в  $\text{CO}_2$  ( $1 \text{ б} = 10^{-28} \text{ м}^2$ ).

Можно пренебречь вкладом продуктов активации кислорода, не оказывающими влияния на внешнюю среду из-за малого периода полураспада ( $T_{1/2} < 30$  с), и реакцией  $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ , так как содержание  $^{17}\text{O}$  в естественной смеси кислорода составляет  $3,74 \cdot 10^{-2}\%$  при сечении активации 0,4 б.

Использование описанного способа на горизонтальных экспериментальных каналах реактора затруднено их конструктивными особенностями. Для этих каналов был сокращен воздухообмен в полостях, находящихся вблизи активной зоны реактора, за счет вставок в канал полых цилиндров из алюминия с торцовыми доньями толщиной 1 мм, длиной 500 мм и диаметром на 2 мм меньше проходного диаметра канала. На доньях, обращенном к активной зоне, сделано отверстие диаметром 0,5 мм для снятия давления в результате теплового расширения воздуха, так как при мощности реактора 16 МВт температура стенки вставки может достигать  $350^\circ\text{C}$ . При большой температуре, возможной при повышении мощности реактора до 30 МВт, вставки можно изготавливать из циркониевых сплавов. Общий эффект сокращения выброса  $^{41}\text{Ar}$  в атмосферу от применения этих способов составляет  $\sim 70\%$ .

Для сокращения выброса радиоактивных осколочных газов, поступающих в систему вентиляции из теплоносителя через его открытую поверхность в баке реактора, были исследованы факторы, оказывающие влияние на их выход. Установлено, что для стационарных условий отношение скорости выхода газов из теплоносителя ( $j_i$ ) к скорости их генерации ( $\kappa_i$ ) подчиняется уравнению

$$j_i/\kappa_i = \gamma/(\lambda_i + \gamma),$$

где  $\gamma = SD/V\sigma$ , с $^{-1}$ ;  $\lambda_i$  — константа распада нуклида;

$S$  — площадь открытой поверхности теплоносителя в баке реактора;  $D$  — коэффициент диффузии нуклида в воде;  $\delta$  — толщина диффузионного слоя;  $V$  — объем теплоносителя.

При постоянстве значений  $\kappa_i$ ,  $D$  и  $V$  сокращение выхода газов из теплоносителя может быть достигнуто уменьшением открытой поверхности теплоносителя и увеличением толщины диффузионного слоя, которая определяется степенью перемешивания теплоносителя в поверхностном слое. Чтобы увеличить толщину диффузионного слоя, по внутреннему периметру бака реактора на глубине 1 м от поверхности воды была установлена кольцевая диафрагма шириной 750 мм. Открытая поверхность воды была сокращена размещением в баке реактора плавующей полиэтиленовой диафрагмы шириной 700 мм.

Эти мероприятия позволили сократить выброс осколочных газов  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{85m}\text{Kr}$ ,  $^{138}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$  в среднем на 55%, а  $^{133}\text{Xe}$  на 7%. Выброс долгоживущих  $^{85}\text{Kr}$  и  $^3\text{H}$  практически остался на прежнем уровне. Необходимо отметить, что одновременно с сокращением выхода осколочных РБГ уменьшился и выброс их дочерних продуктов, входящих в состав аэрозольного компонента выброса.

Кроме того, выброс аэрозольного компонента сокращается не только из-за уменьшения выброса газовых предшественников, но и в результате выведения очистными фильтрами из воды первого контура изотопов, входящих в состав аэрозолей.

Таким образом, при внедрении этих разработок можно снизить выброс радиоактивных продуктов в атмосферу на единицу мощности ВВР-М практически вдвое, что проверено экспериментально. Хотя настоящие исследования относятся только к ВВР-М, общий подход к проблеме снижения выбросов в окружающую среду и разработанные средства могут быть полезны и на других реакторах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Временные методические указания по расчету предельно допустимых выбросов радиоактивных продуктов в атмосферу промышленными предприятиями и энергетическими установками (ПДВ—73). М., Гидрометеоиздат, 1975.
2. Баданина Н. Г. и др. — Атомная энергия, 1975, т. 38, вып. 2, с. 94.
3. Туркин А. Д. Дозиметрия радиоактивных газов. М., Атомиздат, 1973.

Поступило в Редакцию 20.05.80

УДК 669.15\*26\*28

## Жаропрочность низколегированной стали 10X2M в среде натрия с примесью NaOH при 500°C

СТАРКОВ О. В., МУХИН И. П., ЖЕЛНИН В. Д.

Эксплуатационная надежность быстрых реакторов во многом определяется способностью конструкционных материалов парогенераторов выдерживать длительные нагрузки как в чистом натрии, так и в натрии, содержащем примеси кислорода, углерода, азота и гидроксида. Анализ советских и зарубежных исследований влияния натрия, в том числе содержащего примеси кислорода, углерода и азота, на механические свойства сталей показал [1, 2], что натрий реакторной чистоты не является коррозионно-активной средой, тогда как значительное количество неметаллических примесей (кислорода, углерода и азота)

несколько ускоряют коррозионные процессы и заметно ухудшают механические свойства.

Целесообразно исследовать жаропрочность низколегированной хромомолибденовой стали 10X2M при 500°C в натрии с примесью NaOH. Плоские образцы стали шириной 4 мм, толщиной 1 мм и длиной рабочей части 17,5 мм испытывали на длительную прочность и ползучесть в чистом натрии (контрольные испытания) и в натрии, содержащем 2,5 и 5 мас.% NaOH. Эксперименты проводили методом растяжения в специально разработанном вакуумном устройстве при 500°C. После штамповки и опи-