

Электрофорезный фильтр для очистки воды в реакторе

В. Д. Ганжа, А. И. Егоров, Д. М. Каминкер, А. Б. Колядин,
К. А. Коноплев, Ю. П. Сайков, В. Т. Шаров

В воде первого контура реактора Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе АН СССР в результате коррозии образуется труднорастворимая гидратированная окись алюминия. Электрофорезный фильтр, созданный специально для очистки воды, позволил полностью осветлить теплоноситель первого контура реактора. Фильтр имеет полный объем 10,7 л, малое гидравлическое сопротивление и прост в обслуживании. Эффективный расход через фильтр составляет 0,5 м³/ч. Потребляемая мощность 0,3 квт.

В январе 1962 г. было замечено, что вода в первом контуре реактора ВВР-М Физико-технического института им. А. Ф. Иоффе АН СССР [1] стала мутнеть. В июле помутнение воды настолько увеличилось, что это стало серьезно мешать перегрузке твэлов (операции с ними проводятся под защитным слоем воды толщиной 3,5 м).

Появление взвеси в воде наблюдалось и на других реакторах: советском РФТ, польском ВВР-С, где для осветления воды применены механические фильтры [2], и канадском NRU, где вода очищается дистилляцией [3].

Характеристика взвеси

Взвесь состоит из частичек гидратированной окиси алюминия. Размеры частиц колеблются в широком диапазоне (от миллимикрона до десятков микрон) в зависимости от режима работы реактора и очистных устройств. Взвесь

Таблица 1

Состав взвешенных частиц воды первого контура реактора ФТЦ и состав осадка, снятого с поверхности твэла

Вещество	Частицы взвеси, вес. %	Осадок, снятый с поверхности твэла, вес. %
Al ₂ O ₃	54,0	58,0
Fe ₂ O ₃	2,5	4,5
SiO ₂	1,8	2,5
Неопределенные окислы	1,2	1,1
Влага	3,0	3,0
Кристаллизационная вода	33,4	33,2
Всего	95,9	100,6

образуется в результате коррозии алюминия, используемого в качестве конструкционного материала для оболочек твэлов и стенок бака реактора. Химический состав взвеси очень близок к химическому составу продуктов отложения на теплопередающей поверхности твэлов (табл. 1).

Концентрация взвешенных частиц определялась по оптической плотности воды. Наблюдения за увеличением оптической плотности воды в первом контуре реактора, проведенные в течение года, позволили оценить среднюю скорость поступления взвешенных частиц в воду: $P = 1,9 \pm 0,3$ г/Мет·сутки. Такая скорость поступления взвешенных частиц соответствует скорости эрозии алюминиевых оболочек твэлов, равной $(0,41 \pm 0,06) \cdot 10^{-5}$ мм/Мет·сутки, если считать, что эрозии подвергается только теплопередающая поверхность твэлов.

Принцип работы электрофорезного фильтра

В дистиллированной воде сильно диспергированные взвеси обычно устойчивы вследствие электрического заряда частиц. Действительно, в нашем случае оказалось, что частицы под действием электрического поля притягиваются к электродам, причем большинство частиц имеет положительный заряд.

Предположим, что взвесь состоит из частиц разного размера, несущих одинаковые заряды, движение воды между плоскими электродами ламинарное и частицы, достигнувшие электрода, задерживаются (рис. 1). Элементарный объем воды проходит через фильтр за время (время контакта)

$$\tau = \frac{V_{\phi}}{Q}, \quad (1)$$

где V_{ϕ} — объем фильтра; Q — расход воды через фильтр. За это время частицы, движущиеся со скоростью

$$w = uE, \quad (2)$$

(u — подвижность частиц; E — напряженность поля), сместятся по направлению к электродам на расстояние

$$\Delta x = w\tau. \quad (3)$$

Если $\Delta x \geq d$, где d — расстояние между электродами, то все частицы будут задержаны, если же $\Delta x < d$, то концентрация взвеси на выходе из фильтра составит

$$\left. \begin{aligned} C' &= C \left(1 - \frac{uE\tau}{d} \right); \\ C' &= C (1 - \xi), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где C — концентрация взвеси на входе в фильтр; ξ — коэффициент очистки воды фильтром. Для плоских электродов

$$\xi = \frac{uU\tau}{d_2}, \quad (5)$$

для цилиндрических

$$\xi = \frac{2uU\tau}{(R^2 - r^2) \ln \frac{R}{r}},$$

где U — напряжение на электродах; R и r — радиусы внешнего и внутреннего электродов соответственно.

Образец электрофорезного фильтра

Лабораторный образец электрофорезного фильтра имел цилиндрическую форму. Катодом служила внешняя трубка из нержавеющей стали, анодом — стержень из платинированного циркония. Длина фильтра 20 см, радиус 0,75 см, кольцевой зазор между электродами 0,3 см.

Перед электродами устанавливались капроновые мембраны для коагуляции и фильтрации частиц. Однако размер пор в мембранах значительно больше размера частиц взвеси, поэтому при использовании этой ткани в качестве простого механического фильтра вода не очищается.

Зависимость между временем контакта реакторной воды (при температуре 20 и 60° С) и напряженностью поля при коэффициенте очистки, близком к единице, определялась экспериментально (рис. 2). Через фильтр устанавливался определенный расход воды, а затем подбирались такое минимальное напряжение на электродах, при котором коэффициент очистки был больше или равен 0,9. Если эти резуль-

таты подставить в выражение (5), то получим: при 60° С $u = (2,5 \pm 0,6) \cdot 10^{-5}$ см²/сек; при 25° С $u = (5,1 \pm 1) \cdot 10^{-5}$ см²/сек.

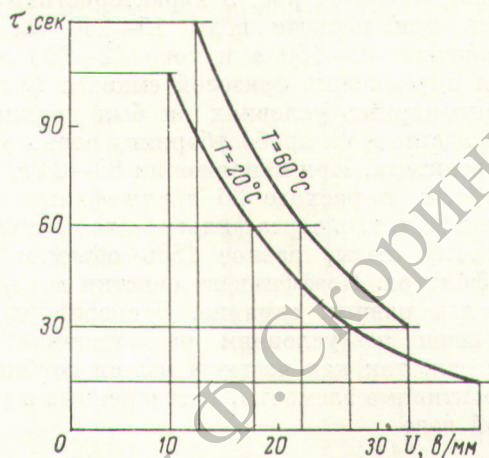


Рис. 2. Зависимость времени контакта от напряженности поля при $\xi \geq 0,9$ для лабораторного образца.

Рис. 1. Схема электрофорезного фильтра: 1 — вход воды с частицами взвеси; 2 — электроды; 3 — мембраны; 4 — выход осветленной воды и пузырьков гремучей смеси; 5 — подача воды для слива пульпы; 6 — сброс пульпы; 7 — подача сжатого воздуха для очистки мембран.

Лабораторный образец электрофорезного фильтра имел цилиндрическую форму. Катодом служила внешняя трубка из нержавеющей стали, анодом — стержень из платинированного циркония. Длина фильтра 20 см, радиус 0,75 см, кольцевой зазор между электродами 0,3 см.

Перед электродами устанавливались капроновые мембраны для коагуляции и фильтрации частиц. Однако размер пор в мембранах значительно больше размера частиц взвеси, поэтому при использовании этой ткани в качестве простого механического фильтра вода не очищается.

Зависимость между временем контакта реакторной воды (при температуре 20 и 60° С) и напряженностью поля при коэффициенте очистки, близком к единице, определялась экспериментально (рис. 2). Через фильтр устанавливался определенный расход воды, а затем подбирались такое минимальное напряжение на электродах, при котором коэффициент очистки был больше или равен 0,9. Если эти резуль-

Однако вычисленные значения u не являются истинными подвижностями, так как при расчете не учитывалось влияние турбулентности на скорость поперечного движения частиц (например, влияние мембран на напряженность поля и жидкости). Тем не менее полученные

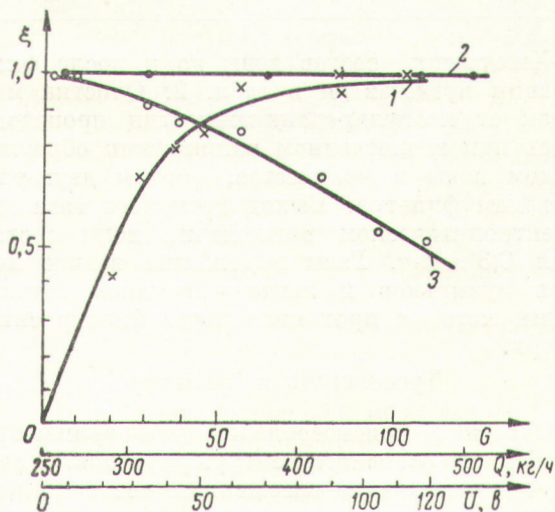


Рис. 3. Зависимость коэффициента очистки от напряжения U на электродах при $Q = 250$ кг/ч, $C = 7$ мг/кг (кривая 1), от расхода Q при $U = 110$ в, $C = 4$ мг/кг (кривая 2) и от количества G задержанной фильтром взвеси при $Q = 500$ кг/ч, $U = 110$ в, $C = 5$ мг/кг (кривая 3).

значения u позволили рассчитать электрофорезный фильтр, обеспечивающий очистку воды в реакторе до необходимого уровня.

Приведенные на рис. 3 характеристики снижались при расходе воды 15—240 мл/мин, напряжении 40—150 в и токе 42—260 ма.

Для определения грязевой емкости фильтра в стационарных условиях он был подключен непосредственно к пробоотборнику первого контура реактора. При напряжении 80—84 в, токе 78—80 ма и расходе 26 г/мин фильтр проработал 32 ч, т. е. через фильтр было пропущено количество воды, равное 1500 объемам данного фильтра. Коэффициент очистки все время оставался равным единице. Эксперимент был прекращен по условиям радиационной безопасности, так как частицы взвеси сорбируют радиоактивные элементы, растворенные в реакторной воде.

Таблица 2

Химический состав реакторной воды на входе в фильтр и на выходе из него

Параметры	На входе	На выходе
Al ₂ O ₃ , мг/кг	3,0	0,0
Fe ³⁺ , мг/кг	0,4	0,18
SiO ₂ , мг/кг	6,0	1,3
Окисляемость, мг O ₂ /кг	0,96	2,96
Оптическая плотность	0,065	0,008

Химический состав воды до и после фильтрации представлен в табл. 2. Очистка мембран от коагулированных частиц производилась при выключенном напряжении обратным током воды в количестве, равном двум-трем объемам фильтра. Выход гремучего газа при электролитическом разложении воды составлял 0,3 л/а.ч. Газы выделялись в виде мелких пузырьков и легко уносились потоком воды, которая проходила через фильтр снизу вверх.

Требования к фильтру

Очистные приспособления устанавливаются на байпасе основного контура реактора. В этом случае накопление взвешенных частиц в контуре описывается уравнением

$$\frac{d(CV)}{dt} = P - Q(C - C'), \quad (6)$$

где V — объем первого контура реактора. Предположим, что ξ , Q , P и V постоянны,

тогда

$$C = C_0 e^{-\frac{Q\xi t}{V}} + \frac{P}{QS} (1 - e^{-\frac{Q\xi t}{V}}), \quad (7)$$

где C_0 — концентрация взвешенных частиц в контуре в момент включения фильтра. Стационарную концентрацию в контуре можно определить из выражения

$$C_\infty = \frac{P}{Q\xi}. \quad (8)$$

Для нашего случая при концентрации взвешенных частиц 2 мг/кг видимость активной зоны реактора падает, а при концентрации 10 мг/кг активной зоны вообще не видно. Концентрация 1 мг/кг не мешает осмотру активной зоны, т. е. исходным параметром является $C_\infty = 1 \text{ мг/кг}$, что при $P = 1,9 \text{ г/Мвт} \times \times \text{сутки}$ обеспечивает требуемый эффективный расход воды через фильтр.

Характеристики фильтра

Исходя из заданного эффективного расхода воды, выбрали следующие параметры электрофорезного фильтра:

Расход осветляемой воды, кг/ч	250—500
Напряжение на электродах, в	110—220
Расстояние между электродами, см	1
Время контакта при $Q = 250 \text{ л/ч}$, мин	2
Объем межэлектродного пространства, л	7,5
Размер электродов, мм	170×572
Число анодных пластин	4
Число катодных пластин	5
Размеры фильтра, мм	400×224×935

Мембраны электродов выполнены в виде чехлов из капроновой ткани. В качестве изоляторов использовано органическое стекло. Катодные пластины изготовлены из стали 1Х18Н9Т, анодные пластины — из платинированного титана. Толщина платинового покрытия составляла 3,0 мк. Стойкость платинового покрытия проверялась специальным опытом. После пропускания 7,56 а.ч/см² (что соответствует 14 000 ч рабочего режима фильтра) поверхность анода осталась без изменения; платины на катоде и в растворе обнаружено не было.

Схема включения фильтра в первый контур реактора показана на рис. 4. Его легко удалось разместить в дренажном канале насосной, окружив разборной биологической защитой из свинца толщиной 13 см. На этом же рисунке приведены характеристики фильтра. Вычисленная по формуле (5) величина u лежит в интервале $(10 \div 20) \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{сек}$. После 100 ч работы

(обычный недельный цикл работы реактора) в фильтре скапливается значительная активность с мощностью дозы γ -излучения до 1000 мкр/сек.

При промывке через фильтр сверху вниз пропускается 20—30 л воды и барботируется воздух в течение 5—10 мин. После промывки очистительные свойства фильтра полностью

примерно 20 л/ч гремучей смеси. Однако это количество мало по сравнению с выделением гремучей смеси вследствие радиолиза в активной зоне (например, в деаэраторе реактора ВВР-М выделяется примерно 800 л/ч гремучей смеси).

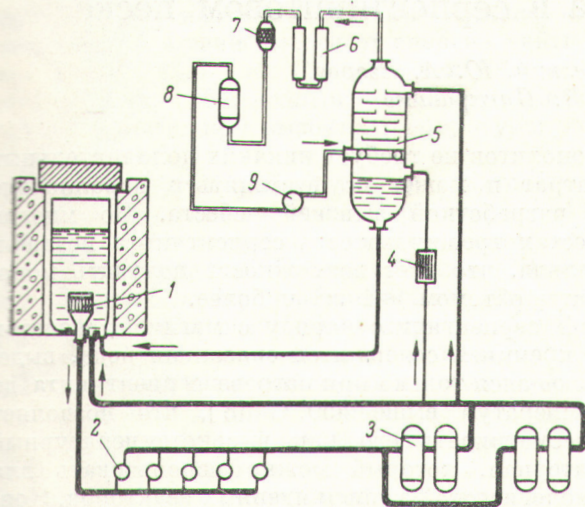


Рис. 4. Схема включения фильтра в первый контур реактора:

1 — активная зона; 2 — насосы; 3 — теплообменники; 4 — электрофорезный фильтр; 5 — деаэратор; 6—9 — элементы контура сжигания гремучей смеси.

восстанавливаются. Эта процедура занимает 15—20 мин и проводится обычно перед пуском реактора.

На рис. 5 показано изменение оптической плотности воды первого контура при работе электрофорезного фильтра. Участки I—III соответствуют работе фильтра без промывки при значениях: $Q = 250 \div 500$ кг/ч; $U = 110$ в; $\xi = 0,9 \div 0,5$; $I = 5a$. Участки IV—IX соответствуют промывке фильтра, которая производилась перед каждым циклом равным 100 ч, при значениях: $Q = 500$ кг/ч; $U = 110$ в; $\xi = 1,0$.

Таким образом, создание электрофорезного фильтра решило проблему очистки воды первого контура реактора. Фильтр (рис. 6) прост по конструкции, имеет малые габариты, просто регенерируется, требует незначительного объема промывных вод, его легко обслуживать, надежен в работе и расходует мало электроэнергии (мощность менее 0,5 кВт). К недостаткам фильтра можно отнести только выделение

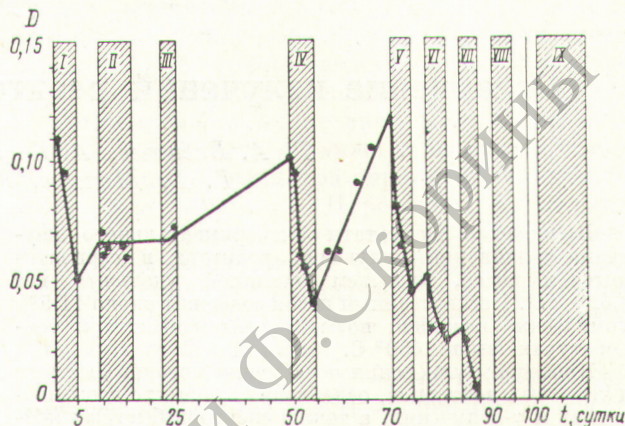


Рис. 5. Изменение оптической плотности D реакторной воды со временем при включении электрофорезного фильтра (заштрихованные участки соответствуют времени работы электрофорезного фильтра).

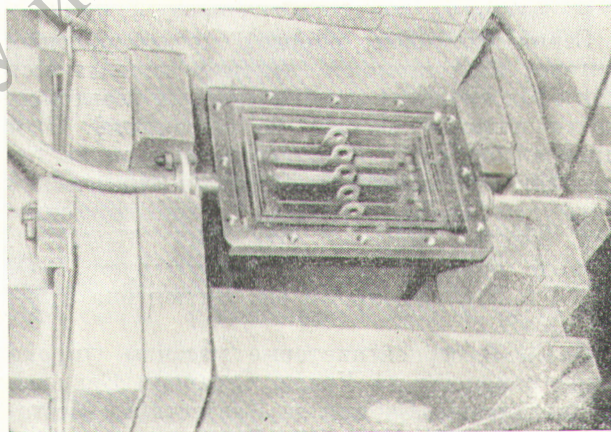


Рис. 6. Электрофорезный фильтр без верхней защиты и крышки.

Авторы считают своим долгом выразить глубокую благодарность академику Б. П. Константинову за постоянный интерес к работе. Авторы благодарят В. П. Родзевича за разработку конструкции прибора, В. Д. Тренина и Р. Н. Родионову за проведение анализов, а также Д. А. Яшина и Б. С. Разова за помощь в работе.

Поступила в Редакцию 4/VII 1964 г.
В окончательной редакции 10/IV 1965 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Гончаров и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии». Докл. советских ученых. Т. 2. М., Атомиздат, 1959, стр. 243.
2. «Атомная техника за рубежом», № 6, 19 (1963).
3. S. Hatches, H. Rae. Nucl. Sci. and Engng, 10, 316 (1961).



УДК 621.039.538.4

Ослабление излучений реактора в серпентинитовом песке

Г. А. Васильев, А. П. Веселкин, Ю. А. Егоров,
Г. Г. Моисеев, Ю. В. Панкратьев

Приводятся результаты экспериментального изучения ослабления излучений реактора в серпентинитовом песке, имеющем насыпной удельный вес $1,62 \text{ г/см}^3$. Исследованный песок содержит около 11,5% химически связанной воды, выделяющейся при температурах выше 450°C .

Проведены измерения ослабления потоков быстрых и тепловых нейтронов, ослабления мощности дозы нейтронов и γ -излучения, а также спектров быстрых нейтронов в серпентинитовом песке. Вычисленные на основании экспериментальных данных длины релаксации быстрых нейтронов сравниваются с длинами релаксации быстрых нейтронов в карбиде бора, серпентинитовом бетоне и железорудном концентрате.

Серпентинитовая порода, представляющая интерес как материал, который используется для биологической защиты ядерных реакторов, почти целиком состоит из серпентина. Этот минерал относится к группе водных силикатов магния; состав его выражается химической формулой $\text{Mg}_3[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_2$. Соотношение окислов (вес.%): MgO 43; SiO_2 44,1; H_2O 12,9. В виде примесей обычно присутствуют FeO , Fe_2O_3 и NiO . Удельный вес серпентина $2,5\text{--}2,7 \text{ г/см}^3$.

В СССР серпентинитовые массивы широко распространены на Урале, Северном Кавказе, в Закавказье, Сибири и Казахстане. Месторождения серпентинита обычно сопутствуют месторождениям асбеста. В настоящее время в Советском Союзе разрабатывается крупнейшее в мире Баженовское месторождение асбеста, а также месторождения в Казахской ССР и Тувинской автономной области. На заводах Баженовского месторождения выход товарного асбеста из 1 т переработанной руды равен 80 кг [1]; оставшаяся масса состоит в основном из серпентинита. В работе [2] сообщается, что в карьере центрального участка Баженовского месторождения обнаружены залежи чистого, не содержащего асбест серпентинита. По утверждению авторов указанной работы, добыча

монолитов не требует никаких дополнительных затрат и может осуществляться параллельно с разработкой залежей асбеста. Во многих местах трещиноватость серпентинита незначительна, что дает возможность получать монолиты объемом $\sim 1 \text{ м}^3$ и более.

В серпентините наряду с магнием, железом и кремнием содержится связанная вода, выделяющаяся только при нагреве серпентинита до температур выше 450°C [3], что позволяет рассматривать его как высокотемпературный материал, который можно использовать для биологической защиты ядерных реакторов. Концентрация ядер водорода в серпентините около 1,5 вес.%, что вполне достаточно для обеспечения одинакового ослабления потока промежуточных и быстрых нейтронов.

При сооружении защиты серпентинит можно использовать как заполнитель для бетона, а также в виде засыпки цельнопиленых блоков. Удельный вес монолитного серпентинита примерно $2,6 \text{ т/м}^3$; теплопроводность $2,16\text{--}2,56 \text{ ккал/м}\cdot\text{ч}\cdot^\circ\text{C}$ [4]. При распиловке серпентинит хорошо держит кромку, что позволяет получать изделия, отличающиеся точностью размеров и обладающие прочностью на сжатие, равной $400\text{--}600 \text{ кг/см}^2$.

Результаты экспериментального изучения защитных свойств серпентинитового бетона описаны в работе [5]. Данных по ослаблению излучений реактора в засыпке из серпентинита в литературе не встречается.

Следует отметить, что в последнее время повышается интерес к рудам и горным породам, которые можно использовать для биологической защиты ядерных реакторов. Так, в работе [6] изучались защитные свойства стандартного железорудного обогащенного концентрата, содержащего ~ 60 вес.% Fe, ~ 30 вес.% O и незначительное количество Si, Mg, Ca, Al и других элементов. Эксперименты, проведен-