

рации иода ($0,2-1 \text{ мг/см}^3$) возникают, как правило, большие окружные деформации оболочек в месте разрушения при $600-750^\circ\text{C}$. При дальнейшем увеличении начальной концентрации происходит значительное уменьшение окружной деформации оболочки в месте разрушения (см. рис. 1).

С увеличением температуры испытаний возрастает концентрация иода, вызывающая уменьшение окружной деформации оболочек: при 600°C до $0,2-1 \text{ мг/см}^3$, 700°C — до 5 мг/см^3 , 750°C , по-видимому, до 15 мг/см^3 .

Экспериментальные данные (см. рис. 2) убедительно подтверждают, что при постоянной начальной концентрации иода $\sim 1 \text{ мг/см}^3$ влияние иода на деформационное поведение оболочек из сплава $\text{Zr}-1\% \text{ Nb}$ проявляется до 700°C , однако при более высокой температуре 750°C начальная концентрация иода должна быть уже не менее 15 мг/см^3 .

Таким образом, присутствие иода может вызвать коррозионное растрескивание под напряжением оболочек из сплава $\text{Zr}-1\% \text{ Nb}$ при температуре не более 700°C . Однако это значение температуры зависит от выгорания, определяющего поступление иода во внутренний объем твэла. И, по-видимому, чем меньше концентрация иода (или меньше выгорание в реальном твэле), тем ниже температура, при которой иод может влиять на характер разрушения оболочки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Головин И.С., Новиков В.В. Работоспособность твэлов при изменении мощности энергетических тепловых реакторов. — Атомная техника за рубежом, 1984, № 3, с. 3—13.
2. Бибилашвили Ю.К., Головин И.С., Сотников А.С. и др. Исследование радиационно-термического разложения иодида цезия и коррозионного растрескивания оболочек твэлов ВВЭР при γ -облучении. — Атомная энергия, 1986, т. 61, № 2, с. 93—95.
3. Решетников Ф.Г., Бибилашвили Ю.К., Головин И.С. и др. Проблемы создания твэлов ВВЭР-1000 для работы в условиях маневренных АЭС и повышенного выгорания. — Там же, 1988, т. 64, вып. 4, с. 258—266.
4. Головин И.С., Бибилашвили Ю.К., Сотников А.С. и др. Внутриреакторные исследования коррозии под напряжением в иоде оболочек твэлов типа ВВЭР из сплава $\text{Zr}-1\% \text{ Nb}$. — In: Proc. Intern. Symp. on Improvements in Water Reactor Fuel Technology and Utilization. Stockholm. 15—19 Sept. 1986; Vienna: IAEA-SM-288/63, 1987, p. 409—419.
5. Hofmann P., Spino J. Determination of the critical iodine concentration for stress corrosion cracking failure of zircaloy-4 tubing between 500 and 900 C. — J. Nucl. Mater., 1982, v. 107, p. 297—310.
6. Hofmann P., Spino J. Chemical aspects of iodine-induced stress corrosion cracking failure of zircaloy-4 tubing above 500 C. — Ibid., 1983, v. 114, № 1, p. 50—65.
7. Hofmann P., Spino J. Stress corrosion cracking of zircaloy-4 cladding at elevated temperatures and its relevance to transient LWR fuel rod behaviour. — Ibid., 1984, v. 125, № 1, p. 85—95.
8. Appelhans A., MacDonald P. — In: Fission Gas Release in LWR Fuel Measured during Nuclear Operation. Enlarged Halden Programme Group Meeting, Lillehammer, Norway, June 1—6, 1980.

Поступила в Редакцию 2.10.96

УДК 621.039.75:628.396:693.54

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ДИСПЕРСНО-АРМИРОВАННОГО БЕТОНА В КОНТЕЙНЕРАХ И ХРАНИЛИЩАХ ДЛЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Рабинович Ф.Н., Лемыш Л.Л. (ЦНИИпромзданий)

Конструкции контейнеров и хранилищ (резервуаров) радиоактивных отходов должны удовлетворять требованиям, направленным прежде всего на минимизацию влияния этих отходов на окружающую среду и исключение опасности для населения [1].

Основной проблемой, возникающей при переработке, транспортировке и захоронении радиоактивных отходов независимо от их агрегатного состояния и активности, является снижение потока ионизирующего излучения до уровня, регламентируемого нормами, и сдерживание процессов выщелачивания и выноса радионуклидов за границы участка захоронения. Эти требования должны соблюдаться в течение достаточно длительного срока, например, при захоронении твердых отходов удельной активностью 10^{-3} Ки/кг этот срок должен составлять не менее 300 лет. Кроме того конструкции контейнеров и хранилищ должны отвечать требованиям механической прочности и герметичности (водо- и газонепроницаемости), не получать проломов, трещин и не открываться при падении с транспортных средств в загруженном состоянии в случае перевозки автомобильным и железнодорожным транспортом на расстояние до 1000 км.

Исследования, проведенные в ЦНИИпромзданий, показали, что для выполнения таких требований эффективно применение композиционных материалов на основе дисперсно-армированного бетона, в том числе при сочетании армирующих волокон (фибр) с традиционной стержневой арматурой (комбинированное армирование). Волокна, пронизывая объем бетона, эффективно воспринимают растягивающие напряжения и препятствуют развитию микротрещин. Показано, например, в работе [2], что введение стальных фибр в бетон (2% по объему) увеличивает сопротивление удару более чем в 3 раза, морозостойкость в 2 раза, предел усталости при изгибе более чем в 2 раза, трещиностойкость (усилия в момент появления первой трещины) в 1,5 раза, прочность на растяжение при изгибе в 2 раза, на сжатие в 1,25 раза. Эффект возрастает при уменьшении диаметра и повышении прочности фибр.

Волокна рационально использовать не только для дисперсного армирования, но и в качестве дополнительного экрана, защищающего вместе с бетоном внешнее пространство от ионизирующего излучения. На практике для ослабления γ -излучения в целях повышения массы в бетон вводят заполнители высокой плотности (чугунную дробь, металлический скрап и др.). Для получения более высокого эффекта традиционные плотные заполнители целесообразно заменять на металлические волокна с конфигурацией, обеспечивающей их анкеровку в бетоне. В этом случае волокна будут выполнять роль подобных заполнителей, способствовать блокированию энергии излучения и осуществлять при этом функции, связанные с восприятием растягивающих напряжений. Для ослабления нейтронного потока необходимы волокна небольшой массы на основе, как правило, полимерных композиций. В реальных условиях для армирования бетона целесообразно сочетание смеси волокон, обладающих высокой плотностью, и сравнительно легких, например, металлических и на основе полиэтилена.

Существенное повышение прочности и герметичности контейнеров и хранилищ может быть достигнуто подбором состава и применением специального бетона для получения матрицы. При использовании бетона на основе силикатных вяжущих рекомендуется применение сульфатостойкого портландцемента без минеральных добавок, вводимых при помоле. Следует применять только морозостойкий щебень высокого качества из пород, обеспечивающих прочность на сжатие в 1,5–2 раза более высокую, чем требуется для бетона. Песок должен иметь модуль крупности 2,1 и выше. Рекомендуется вводить в бетон добавки, которые должны вовлекать в бетонную смесь 3–6% по объему воздуха. С учетом этих рекомендаций ЦНИИпромзданий разработаны составы сталефибробетона, обеспечивающие его морозостойкость до марки F1000 (композиция выдерживает без потерь прочности до 1000 циклов замораживания-размораживания).

Для рассматриваемых конструкций важной является такая физическая характеристика бетонной матрицы, как ее непроницаемость, характеризующая способность материала противостоять фильтрации через него жидкостей и газов. Наиболее обобщенной характеристикой является водонепроницаемость бетона. Составы сталефибробетона, разработанные в ЦНИИпромзданий, удовлетворяют маркам по водонепроницаемости W8–12.

В случаях, когда контейнеры и хранилища должны обеспечить защиту от нейтронов, целесообразно применять гидратный бетон с большим содержанием химически связанной и полусвязанной воды. В определенных случаях для повышения герметичности и непроницаемости целесообразна пропитка поверхности бетона расплавом серы.

Таким образом, путем подбора комбинаций составов и видов бетона и различных модификаций армирующих волокон можно достичь высокие эксплуатационные качества контейнеров и хранилищ для радиоактивных отходов.

Расчеты показали, что для твердых отходов низкой и средней удельной активности не более 10^{-3} Ки/кг необходимость снижения мощности дозы на наружной поверхности контейнера до уровня не более 200 мбэр/ч не определяет его толщину. В этом случае толщина контейнера или хранилища определяется из расчета конструкции по прочности и герметичности (трещиностойкости, водонепроницаемости, морозостойкости, долговечности), для транспортных контейнеров — по ударостойкости. Установленная по этим показателям толщина конструкции, как показали расчеты, удовлетворяет требованиям по γ -радиационной безопасности. Для хранения отходов указанной удельной активности может быть использован бетон плотностью $2,5 \text{ г/см}^3$ с крупным заполнителем из базальтового или гранитного щебня с фракциями размером до 10 мм и кварцевым песком. В этом случае в качестве вяжущего для получения бетона целесообразно использовать расширяющийся или сульфатостойкий цемент, в качестве армирующих компонентов — коррозионно-устойчивые металлические волокна (фибры) на основе аморфного железа, получаемого из расплава.

Для емкостей, содержащих радиоактивные отходы удельной активностью выше 10^{-3} Ки/кг, толщина ограждений устанавливается, как правило, из условия радиационной защиты. Рассчитанная из этого условия толщина конструкции удовлетворяет предъявляемым к ней требованиям по прочности и другим механическим показателям. В этой ситуации наиболее перспективным оказывается сочетание коррозионно-устойчивых металлических и неметаллических (стеклянных, базальтовых, углеродных) высокопрочных волокон и силикатного или специального полимернеорганического бетона. Рационально также применение многослойных (в основном трехслойных) конструкций ограждений с использованием различных модификаций композиционных материалов, обеспечивающих интенсификацию термодинамического равновесия между резервуаром и окружающей средой. При армировании бетонных и полимернеорганических матриц в разных слоях ограждений эффективно сочетание коротких волокон со свободной их ориентацией в объеме матрицы и непрерывных направленно-ориентированных (со сплошной намоткой) предварительно напряженных волокон. Такие решения хранилищ требуют последующей экспериментальной апробации.

С учетом описанных положений в ЦНИИпромзданий разработаны технические решения хранилищ (резервуаров) и рабочие чертежи опытных образцов контейнеров для твердых радиоактивных отходов удельной активностью 10^{-3} Ки/кг. По заданию МосНПО «Радон» предусмотрены два варианта таких контейнеров — с размещением в каждом из них четырех металлических бочек с отходами массой 2 т и с размещением отходов массой 4 т непосредственно в контейнере. Контейнеры предназначены для перевозки радиоактивных отходов с помощью любых видов транспортных средств, специально оборудованных для этих целей и обеспечивающих безопасность, в том числе на автомобильном, железнодорожном транспорте и др. Они могут использоваться также для временного хранения и постоянного захоронения (в последнем случае контейнеры с отходами располагаются в стационарных хранилищах).

Контейнеры предполагается изготавливать из сталефибробетона. Размер в плане 1545×1545 мм, высота 1280 мм, толщина стенок 125 мм. При таких геометрических параметрах мощность дозы на наружной поверхности не превышает 200 мбэр/ч, а сами контейнеры удовлетворяют требованиям по прочности и трещиностойкости, в том числе при условии их падения в нагруженном состоянии с высоты 1,2 м на любую

плоскость или угол. Бетон предусматривается использовать химически стойкий с плотными заполнителями (класс по прочности на сжатие В40, марка по морозостойкости F600, водонепроницаемости W10). Для дисперсного армирования бетонной матрицы рекомендуются коррозионно-устойчивые металлические фибры аморфного состава с расчетным сопротивлением разрыву не менее 1000 МПа. Расход фибр — 120 кг на 1 м³ бетона.

В настоящее время для размещения радиоактивных отходов используют индивидуальные конструкционные решения приповерхностных железобетонных резервуаров. До сих пор нет общей технической концепции исполнения контейнеров и хранилищ, базирующейся на типовых модульных узлах и унификации в системе транспортное средство—контейнер—резервуар, на порядке взаимосвязи указанных факторов от пунктов переработки и последующего перемещения до постоянного захоронения.

При разработке технических решений резервуаров (хранилищ) с использованием дисперсно-армированного бетона в качестве исходного критерия был принят единый модуль, обеспечивающий связь в указанной технологической системе. Габаритные размеры разрабатываемых хранилищ были приняты кратными размерам контейнеров, которые, в свою очередь, кратны габаритам соответствующих транспортных средств. При этом принимали также во внимание, что конструкции ограждений хранилищ (стены, перекрытия) должны выполняться в опалубочных габаритах типовых элементов многофункционального назначения.

Резервуары разработаны в полузаглубленном исполнении с обваловкой и представляют собой сборно-монолитные сооружения прямоугольной формы в плане с габаритными размерами, позволяющими их возводить без устройства температурно-усадочных швов. Наибольший размер хранилища не превышает 40 м. Резервуары выполнены в четырех вариантах: одно-, двух-, четырех- и восьмисекционными. В каждой секции-отсеке размещается 288 контейнеров. Поперечные размеры каждого отсека составляют 5 м (приняты из условия размещения в этом направлении трех контейнеров с размерами в плане 1545×1545 мм), длина в продольном направлении (в осях) 39 м и в этом направлении размещают 24 контейнера. Контейнеры в хранилище располагаются в четыре ряда по высоте.

По аналогии с ранее разработанными ЦНИИпромзданий конструкциями унифицированных панелей стен подземных сооружений, в том числе для резервуаров различного функционального назначения, стены резервуаров запроектированы из сборных сталефибробетонных панелей с башмаком в нижней части. Высота стеновых панелей 5,45 м, ширина 3 м, толщина 0,285 м (установлена из расчета прочности и трещиностойкости). Вертикальные стыки между панелями стен шпоночного типа замоноличиваются под давлением снизу вверх раствором на напрягающем цементе. Днища резервуаров монолитные из сталефибробетона (сталефиброжелезобетона) толщиной 300 мм. Показатели сталефибробетона для резервуаров те же, что и указанные ранее для контейнеров, но расход фибр существенно меньше — 80 кг на 1 м³ бетона. Более высокий расход фибр в контейнерах (120 кг/м³) связан прежде всего с опасностью падения контейнера при транспортировке. Наряду с дисперсным армированием фибрами конструкции резервуаров включают дополнительные арматурные сетки с цинковым покрытием толщиной не менее 30 мкм.

В конкретных ситуациях в зависимости от технологических циклов и условий переработки радиоактивные отходы могут захораниваться непосредственно в резервуаре без использования дополнительных контейнеров. Масса отходов в односекционном резервуаре составляет 576 т для варианта с контейнерами и бочками или 2250 т для размещения отходов непосредственно в резервуаре. В восьмисекционном резервуаре эти же показатели составляют 4600 и 18 800 т соответственно.

Проведено сопоставление материалоемкости железобетонного резервуара, эксплуатируемого на базе МосНПО «Радон», с резервуаром, разработанным из конструкций

с применением композиционных материалов на основе дисперсно-армированного бетона и унифицированных панелей стен. В первом случае расход железобетона, приходящийся на 1 т размещаемых отходов, составляет $0,128 \text{ м}^3/\text{т}$, во втором — $0,07 \text{ м}^3/\text{т}$.

В дальнейшем представляется целесообразным разработать на основе единого модуля унифицированный типоряд контейнеров и резервуаров для различных видов радиоактивных отходов и экспериментально апробировать эти решения.

Таким образом, установлено, что применение композиционных материалов на основе бетонных матриц, дисперсно-армированных высокопрочными волокнами, в контейнерах и резервуарах радиоактивных отходов эффективно. Используемые для дисперсного армирования волокна (фибры) могут выполнять функции не только армирующих элементов, но и дополнительных экранов, снижающих наряду с бетоном поток ионизирующего излучения до уровня, регламентируемого нормами. При разработке контейнеров и хранилищ целесообразно основываться на едином модуле в системе транспортное средство—контейнер—резервуар, унификации параметров, предопределяющей возможность доведения до типового исполнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соболев И.А., Хомчик Л.М. Обезвреживание радиоактивных отходов на централизованных пунктах. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. Рабинович Ф.Н. Дисперсно-армированные бетоны. М.: Стройиздат, 1989.

Поступила в Редакцию 12.11.96

УДК 541.15

РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ ГИДРАЗИНА В УСЛОВИЯХ ПЕРВОГО КОНТУРА АЭС С ВВЭР

Архипов О.П. (ОКБ «Гидропресс»), Бугаенко В.Л. (ГНЦ РФ — ИТЭФ),
Кабакчи С.А. (ГНЦ РФ — НИХФИ им. Л.Я. Карпова),
Пашевич В.И. (Международная академия информатизации)

Гидразин, являясь сильным восстановителем, нашел широкое применение как в тепловой, так и в ядерной энергетике для удаления кислорода, растворенного в водяном теплоносителе. На некоторых АЭС с ВВЭР в качестве источника водорода, необходимого для подавления радиолитического распада воды в теплоносителе первого контура, используется гидразин-гидрат.

Гидразин при прохождении по тракту подпитки первого контура и непосредственно внутри первого контура ВВЭР участвует в трех реакциях: окисления, термического распада и радиолитического разложения (преимущественно в активной зоне).

Окисление гидразина. В воде в отсутствие примесей, а также контактирующей с неокисленной металлической поверхностью, гидразин медленно окисляется в соответствии с бурто-реакцией



В водяном теплоносителе ТЭС или АЭС, содержащем кислород, взвесь оксидов железа и находящемся в контакте с окисленными металлическими поверхностями, процесс окисления носит сложный многостадийный характер и протекает следующим образом [1—5]: на первой стадии при достаточном количестве оксидов металлов (например, железа) преобладают реакции восстановления оксидов и гидроксидов