

К. А. ПИРАДОВ (Московский государственный открытый университет, Россия)

ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Стаття присвячена питанню довговічності залізобетонних конструкцій при дії на них силових і радіаційних навантажень. Розрахунок виконано за допомогою методів механіки руйнування. В розрахунок враховані пошкодження отримані конструкціями в процесі їх експлуатації.

Ключові слова: атомна електростанція, реактор, залізобетон, довговічність, радіація, землетрус

Статья посвящена вопросу расчёта долговечности железобетонных конструкций при воздействии силовых и радиационных нагрузок. Расчёт выполнен с помощью методов механики разрушения. В расчёте учтены повреждения, полученные конструкциями в процессе их эксплуатации.

Ключевые слова: атомная электростанция, реактор, железобетон, долговечность, радиация, землетрясение

Article is devoted a question of calculation of durability of ferro-concrete designs at influence of power and radiating loadings. Calculation is executed by means of methods of mechanics of destruction. In calculation the damages received by designs in the course of their operation are considered.

Keywords: atomic power plant, nuclear reactor, concrete, durability, radiation, earthquake

В то утро 11 марта 2011 года мы все осознали, насколько незащитны перед земной стихией. Причём несчастье обрушилось на наиболее подготовленную к природным катаклизмам страну. Страну, которая постоянно наращивала защищённость своих островных территорий и жила в состоянии готовности к сейсмическому удару и его последствиям. Страшно даже представить последствия подобной катастрофы, произойди она в другой менее подготовленной к землетрясениям, извержениям вулканов, цунами стране. Землетрясение магнитудой 8...9 баллов по шкале Рихтера вызвало разрушения, но настоящая катастрофа наступила с приходом гигантской 12-метровой волны цунами. Сразу после землетрясения стала поступать информация об аварийных остановках на ряде японских АЭС. В частности, на АЭС «Онагава» в префектуре Мияги сработала аварийная система защиты, которая остановила работу одного из энергоблоков. Вскоре после происшествия премьер-министр Японии Наото Кан заявил, что утечки радиации на атомных электростанциях в Японии в результате землетрясения не произошло. Позднее средства массовой информации сообщили о том, что в турбинном зале данной АЭС произошло возгорание, но инцидент не привел к утечке радиации.

МАГАТЭ сообщило о принудительной остановке в целях безопасности реакторов четырех японских АЭС, находящихся в пострадавшем от землетрясения районе. В 20.14 11 марта стало известно, что Токийская энергетическая компания (Tokyo Electric Power Company

(TEPCO)) заявила о повышении уровня радиации внутри здания атомной электростанции в префектуре Фукусима. По информации TEPCO, повышение уровня радиации наблюдалось в турбинном отделении первого реактора АЭС. В 01.40 12 марта стало известно, что уровень радиации на одном из реакторов АЭС «Фукусима-1» уже в тысячу раз превысил норму в связи с отключением охлаждающей системы, вызванным землетрясением. Премьер-министр Японии Наото Кан распорядился эвакуировать всех людей, проживающих в пределах 10-километровой зоны вокруг АЭС. В 02.39 средства массовой информации сообщили, что власти Японии объявили чрезвычайную ситуацию на еще одной АЭС – «Фукусима-2» – в связи с выходом из строя после землетрясения системы охлаждения на трех реакторах. Ранее чрезвычайная ситуация была введена на АЭС «Фукусима-1» из-за прекращения подачи электричества, необходимого для охлаждения реактора. В 08.43 стало известно, что радиоактивный цезий обнаружен возле первого блока АЭС «Фукусима-1», что означает расплавление топлива в сердцевине реактора. Из десятикилометровой зоны вокруг АЭС были эвакуированы жители. В 11.36 по данным компании Tokyo Electric Power Company на АЭС «Фукусима-1» после сильного подземного толчка раздался взрыв. После него появилось задымление, а четыре человека, принимавших участие в работах на станции, получили ранения и направлены в больницы. Взрыв произошел между оболочкой, защищающей стержни реактора, и внешней

стенной блока. Металлическая оболочка, защищающая ядерное содержимое реактора, была не повреждена. Далее сводки с места катастрофы напоминали военные. Одна за другой разрушались конструкции станции.

Большинство строительных конструкций в комплексе зданий и сооружений атомных станций выполняется из железобетона и оценка их технического состояния, жизнеспособности и остаточного ресурса, основанная на изучении и прогнозировании процесса разрушения, является важнейшим фактором в обеспечении безопасной эксплуатации атомных станций, в том числе и в критических ситуациях при развитии ситуации по самым тяжёлым и неблагоприятным сценариям и угрозе радиоактивного заражения окружающей станцию местности. Железобетонные конструкции могут выполнять разноплановые функции – несущие и ограждающие, – и воспринимать, как механические, так и температурные, влажностные и радиационные нагрузки, каждая из которых будет оказывать влияние на долговечность и остаточный ресурс эксплуатируемых конструкций.

Оценить этот ресурс – это значит твёрдо знать сроки безопасной эксплуатации, как конструкций станций, так и всего энергетического комплекса в целом; предусмотреть возможные причины и последствия образования макро и микродефектов в бетоне и в арматуре; выявить возможные траектории развития трещин или полностью исключить вероятность их возникновения. А также вовремя принять меры для локализации повреждений в конструкциях и недопущения необратимых последствий для всего сооружения в целом при аварийной ситуации на станции, а также после стабилизации обстановки на АЭС при принятии решения о её дальнейшем использовании. Потому оценка остаточного ресурса производится методами механики разрушения железобетона, учитывающими структурные изменения бетона во времени под действием внешних силовых и несиловых воздействий, при проведении предшествующих натурных и лабораторных исследований.

Метод базируется на следующих основных принципах и положениях, которые определяют долговечность и механизмы разрушения бетона:

1) бетон рассматривается как упругая квазигомогенная двухкомпонентная среда, состоящая из: а) матрицы – цементного камня со структурными элементами щебня и песка; б) пустот, капилляров и трещин;

2) все пустоты в структуре бетона могут быть рассмотрены как трещиноподобные дефекты этой структуры. Генерация трещин протекает во времени, и этот процесс можно назвать «старением бетона»;

3) пустоты в матрице представлены соподчиненной пятиуровневой системой (по форме и размерам, кратным диаметру; чем больше кратное, тем выше уровень (табл. 2);

4) процесс формирования и движения трещин рассматривается как результат внешних силовых и несиловых воздействий: в вершине каждой трещины своего уровня в каноническом объёме бетона возникают поля деформаций и напряжений, создающие схемы нормального отрыва и сдвига;

5) в качестве обобщенной константы свойства трещиностойкости бетона, его сопротивления образованию, накоплению в объёмах и формированию магистральных трещин критических величин принят параметр $K_C(t)$ как алгебраическая сумма критических значений K_C во всей системе уровней трещин-пустот, заполняющих канонический объём до критической концентрации;

6) внешние температурные, влажностные и коррозионные длительные воздействия создают поля напряжений в вершинах пустот - трещин, оценка которых учитывается параметром D с применением положений теории старения бетона: $K_{1C}(t) = K_{1C}(\tau) \cdot D$;

7) напряженно-деформированное состояние (НДС) конструкции зависит от размеров и количества структурных дефектов и повреждений в бетоне и арматурной стали, интенсивности и режимов температурных, влажностных, коррозионных и силовых воздействий;

8) трещины в структуре бетона, развивающиеся по механизмам нормального отрыва и поперечного сдвига, оказывают доминирующее влияние на несущую способность сечений железобетонных конструкций. Достигая критических размеров в процессе восприятия силовых и температурных воздействий, эти трещины приводят к локальным нарушениям сплошности сечений и к разрушению элемента в целом;

9) при определении долговечности железобетонных конструкций на стадии роста трещин в механике разрушения бетона используется понятие суммарной скорости; суммарная скорость развития трещины равна арифметической сумме скоростей от действия статической и циклической нагрузок, от тепло – влажност-

ного, коррозионного и радиационного воздействий.

Долговечность рассматривается как третье предельное состояние, определяемое временным отрезком, в пределах которого в бетоне вследствие тепловых и коррозионных процессов, а также механических напряжений, суммарная характеристика структурных дефектов, накопившихся в матрице и заполнителях, достигает критической величины, а остаточные физико-механические свойства удовлетворяют условиям эксплуатации. Коэффициент интенсивности напряжений железобетона принима-

ется за основную характеристику, оценивающую накопление повреждений в материале. Этот коэффициент, являясь структурной постоянной материала, является главной характеристикой вязкости разрушения железобетона и основным параметром, лимитирующим его долговечность.

Оценка остаточного ресурса железобетонных конструкций производится по признаку исчерпания предела долговечности их во времени. Критические значения K_{IC} , K_{IC} представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость параметров вязкости разрушения от класса бетона и категории долговечности

Класс бетона по прочности B и по энергии разрушения B_g	B20 B_g-90			B30 B_g-105			B40 B_g-120		
	A(50)	B50 – B75	C(>75)	A(50)	B50 – B75	C(>75)	A(50)	B50 – B75	C(>75)
Коэффициент интенсивности напряжений при нормальном отрыве K_{IC} , МПа м ^{1/2}	0,6... 0,8	0,8... 0,9	0,9... 1,05	0,5... 0,7	0,7... 0,85	0,85... 0,95	0,4... 0,6	0,6... 0,8	0,8... 0,9
Коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге K_{IC} , МПа м ^{1/2}	6,9... 9,2	9,2... 10,8	10,8... 12,2	5,8... 8,1	8,1... 9,8	9,8... 11,1	4,7... 6,8	6,8... 8,6	8,6... 11,0

Алгоритм расчета долговечности и остаточного ресурса бетона включает в себя:

1. Сведения об внешних и других силовых воздействиях (температуры, влажности, коррозии) по проектным данным и результатам технического обследования. Срок службы по проекту.

2. Данные о свойствах компонентов бетона. Вид, количество, размер зерен заполнителя. Первичная защита от коррозии.

3. Данные об активности цемента, прочности заполнителя, бетона и упругих свойствах. Трещиностойкость бетона.

4. Расчет пустотности бетона, общей, капиллярной, дифференциальной и интегральной

концентрации пустот. Классификация видов и количества пустот.

5. Операции по расчету коэффициентов интенсивности напряжений и их критических значений.

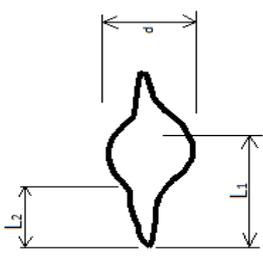
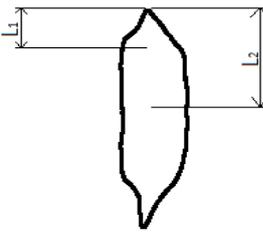
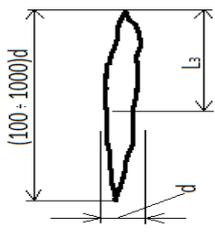
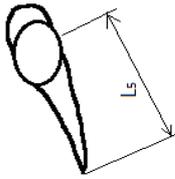
6. Операции по расчету долговечности от длительного воздействия всех внешних факторов, в том числе редакции.

7. Определение остаточного ресурса железобетонных конструкций.

Позиции 2, 3, 4 определяются по результатам морфологического анализа структуры бетонных образцов или по табл. 2 и 3.

Таблица 2

Параметры трещиностойкости различных дефектов структуры

1	2	3	4	5
				
	Круглые	Эллипсовидные	Трещиноподобные	Крайевые
	Замкнутые			
	$K_{IC} = A_p \sqrt{\pi L \left(a + \frac{d}{L_1} \right)}$	$K_{IC} = B_p \sqrt{\pi L (a + L_2)}$	$K_{IC} = C_p \sqrt{\pi L_3}$ $K_{IIC} = C_T \sqrt{\pi L_3}$	$K_{IC} = D_p \sqrt{\pi L_4}$ $K_{IIC} = D_T \sqrt{\pi L_4}$
	$K_{IC} = E_p \sqrt{\frac{\pi L_5}{2}}$ $K_{IIC} = E_T \sqrt{\frac{\pi L_5}{2}}$			Околозерновые: радиальные и вокруг зерна заполнителя
A	B	C	D	E
1,733	1,055	1,0122/1,0205	0,2303/0,2004	0,643/0,060
1,912	1,1003	1,0212/1,0417	0,3116/0,1997	0,651/0,061
2,067	1,2794	1,0480/1,0630	0,3992/0,1901	0,657/0,063
2,235	1,4212	1,0647/1,0890	0,4570/0,1762	0,682/0,068
2,506	1,6517	1,1010/1,1812	0,5640/0,1592	0,701/0,072
2,923	1,8432	1,1535/1,2810	0,6810/0,1446	0,793/0,081
3,084	2,002	1,4032/1,4216	0,7632/0,1410	0,854/0,087
3,512	2,176	1,5547/1,5732	0,8720/0,1337	0,892/0,092

Критерием трещиностойкости в механике разрушения является структурный параметр материала, выраженный через коэффициент интенсивности напряжений (КИН) – K . Показатели трещиностойкости бетона K_{IC} и K_{IC} релаксируют во времени, их можно определить аналитически с учетом фактора времени для бетона заданного состава. Параметры трещиностойкости бетона K_{IC} и K_{IC} начинают снижаться, достигая в пределе значения:

$$K_C^{lim} = K_C^{max} / \left((1 + 2E_b(1 - \nu^2)) \cdot C \cdot (t, \tau) \right)^{1/2},$$

где $C(t; \tau)$ – мера ползучести бетона, E_b – модуль упругости, ν – коэффициент поперечной деформации.

Таблица 3

Содержание дефектов различных типов в единице объема бетона в зависимости от пористости бетона и объемного содержания заполнителя

Пористость бетона	Объемное содержание заполнителя	Тип дефекта				
		1	2	3	4	5
		Содержание дефектов в единице объема бетона, %				
0,02	0,0	40	30	25	5	0
	0,2	36	26	24	4	10
	0,4	33	23	20	4	20
0,04	0,0	30	30	30	10	0
	0,2	26	26	28	8	12
	0,4	24	24	23	5	24
0,06	0,0	30	26	26	16	0
	0,2	24	24	25	13	14
	0,4	20	20	21	11	28
0,08	0,0	29	26	26	9	0
	0,2	23	23	23	15	16
	0,4	19	15	23	14	32
0,10	0,0	28	27	25	20	0
	0,2	26	20	20	16	18
	0,4	20	18	16	10	36
0,12	0,0	27	23	25	25	0
	0,2	22	18	21	19	20
	0,4	20	14	18	8	40

Долговечность железобетонной конструкции в условиях температурных и влажностных воздействий зависит от количества структурных дефектов в бетоне и изменения физико-

механических свойств в бетоне и арматуре, от интенсивности этих воздействий.

Для конкретного состава бетона определим предельное значение критического коэффициента интенсивности напряжений по формуле:

$$K_{IC} = -0,015 + 0,001R_{ag} - 0,133Ц/В + 0,006R_c - 0,08W - 0,538K_{ag}$$

где R_{ag} – прочность заполнителя; Ц/В – цементно-водное отношение; R_c – активность цемента; W – влажность бетона; K_{ag} – количество крупного заполнителя в единице объема массы. Это максимально возможное значение коэффициента интенсивности напряжений, с течением времени оно будет уменьшаться ввиду климатических, радиационных и других видов воздействий.

Дефекты структуры бетона, как исходные, так и развивающиеся в результате силовых и не силовых воздействий разделяются на 5 основных видов (см. табл. 3).

Содержание пустот – пор и трещин видов 1, 2, 3 и 4 зависит от пористости бетона, а вида 5 – от объемного содержания зерен мелкого или крупного заполнителя.

Объемное содержание каждого вида пустот, пор и трещин зависит от пористости материала и объемного содержания заполнителя в бетоне и определяется физико-химическими исследованиями образца бетона. Если прогноз долговечности производится без изготовления кернов и опытных образцов, тогда необходимо пользоваться табл. 3, при этом точность результатов расчета будет несколько ниже.

Определив значения коэффициентов интенсивности напряжений для каждого вида пустот при температурном и влажностном воздействии в холодное K_{1W}^{tw} и теплое K_{1S}^{tw} время года и от силовой нагрузки K_1^n , находим суммарный коэффициент интенсивности напряжений:

$$K_{1W}^{tw} = \sum K_i K_{1W}^{itw},$$

$$K_{1S}^{tw} = \sum K_i K_{1S}^{itw},$$

$$K_{1N} = \sum K_{1S(w)} / 2,$$

где K_i – количество того или иного трещиноподобного дефекта в общем количестве микро и макроповреждений, определяемое по табл. 3.

Если конструкция находится в зоне действия радиоактивного излучения, то необходимо учесть влияние радиации на величину K_{1N} . Результаты экспериментальных исследований по радиационной стойкости, характеризующей способность бетона в определенных пределах сохранять свои свойства после облучения, показывают, что бетоны обладают удовлетворительными защитными свойствами.

Влияние радиации на свойства бетона может быть классифицировано следующим образом:

- влияние быстрых и тепловых нейтронов, испускаемые активной зоной реактора;
- влияние гамма-лучей, возникающих в конструкциях в результате захвата нейтронов элементами корпуса, в особенности стальными.

Эти составляющие оказывают различное воздействие на бетон. Облучение быстрыми нейтронами приводит к значительному увеличению объема бетона, вызванному увеличением объема заполнителя. Влияние тепловых нейтронов считается незначительным, за исключением воздействия на материалы, содержащие барий и литий, приводящие к дальнейшему смещению атомов из-за образования α -частиц. Гамма-лучи вызывают радиолиз воды в цементном тесте, что приводит к некоторому изменению усадочных и деформативных свойств бетона и выделению газа, который не влияет на коррозию арматуры. Таким образом, изменение свойств бетона, в основном зависит от изменения свойств заполнителей при облучении быстрыми нейтронами, и начинает проявляться после действия интегрального потока нейтронов 10^{19} нейтрон/см².

Состав материалов, применяемых для заполнителей, определяется слагающими их породообразующими минералами. Основными породообразующими минералами для гранита являются силикаты, для известняка – карбонаты.

Радиационная стойкость применяемых материалов различна и зависит от строения кристалла. Минералы класса силикатов (гранит) после облучения интегральным потоком нейтронов 10^{19} нейтрон/см² начинают изменять свойства. Степень изменения после облучения зависит от строения кристаллов и содержания SiO₂. Изменение плотности в результате облучения минералов силикатов одинакового строения пропорционально содержанию двуокиси кремния: чем больше содержание SiO₂, тем больше изменяется плотность. По мере увеличения интегрального потока нейтронов растут радиационные деформации материалов. При интегральном потоке нейтронов $11,2 \times 10^{19}$ нейтрон/см² при температуре 100 °С радиационно-температурные деформации гранита составляют 2,65 %, а при интегральном потоке нейтронов $28,1 \times 10^{19}$ нейтрон/см² и 180 °С деформации составляет 6,42 %. После облучения интегральным потоком нейтронов $28,1 \times 10^{19}$ нейтрон/см² у гранита наступает саморазрушение. При относительно низких интегральных потоках нейтронов ($10^{18}/10^{19}$ нейтрон /см²) и аморфизации кристаллической структуры минералов теплопроводность гранита снижается и при радиационных деформациях 1, 2 и 3 % со-

ставляет соответственно 10, 15 и 20 % и может доходить до 50 % с увеличением радиационной деформации. У известняка, состав которого определяется минералами класса карбонатов, после облучения интегральными потоками нейтронов ($12...28,3 \times 10^{19}$ нейтрон/см² радиационных деформаций не обнаружено.

Цементный камень после облучения интегральными потоками нейтронов до 200×10^{19} нейтрон/см² имеет усадку до 3 %, которая превышает усадку нагретых контрольных образцов, равную 2 %. При этом не обнаруживается изменение веса, температурных деформаций, теплопроводности, прочности и деформативности облученных образцов по сравнению с нагретыми контрольными. Цементный камень имеет только отрицательные радиационные деформации.

В бетоне на гранитном заполнителе радиационные деформации будут больше, чем в бетоне на заполнителе из известняка. Раствор с расходом портландцемента 500 кг песка из 1600 кг гранита и воды (270 кг/м³) при облучении интегральным потоком нейтронов от 8 до 28×10^{19} нейтрон/см², испытанный при температурах нагрева 100...400 °С, имеет прочность на сжатие 27 МПа и радиационную деформативность при нагрузке (0,2...0,5) R_b от 1,08...1,14 до 0,65...0,93. Радиационные деформации в 3...4 % сохраняют прочность на сжатие бетона с крупным заполнителем из гранита.

Потому величина K_{IN} при радиационном воздействии можно определить по формуле $K_{IN} = 0,9358K_{IC}$.

Долговечность бетона железобетонных конструкций или время, в пределах которого структурные параметры бетона принятого состава достигнут предельных значений, равно:

$$T = 2(K_{IC} - K_{IN}) / |K_{IW}^{tw} - K_{IS}^{tw}| / W \text{ (результат – в годах),}$$

где W – концентрационный критерий меры повреждения.

Долговечность с учетом длительности воздействия нагрузки определяется по формуле:

$$T = K_{IC}^{\max} \cdot (1 + 2E_b C(t; 28)) \cdot \left(1 - C^{-g(t-28)} / K_{IC}\right)^{1/2} \text{ (результат – в годах),}$$

где $K_{IC} = K_1^n + ((K_{IC} \cdot \pi 3 / 2) - 0,63) \cdot 10^4$;

g – численный коэффициент.

За остаточный ресурс принимается наименьший результат, полученный по двум последним формулам.

Поступила в редколлегию 25.04.2011

Принята к печати 11.05.2011.