

А. П. КРУКОВСКИЙ, В. В. КРУКОВСКАЯ (Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова, Днепропетровск) С. Д. ГРЕБЕНЮК (ЗАО «Донецксталь»)

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГЛУБЛЕННЫХ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ ШАХТНОГО ВОДОСБРОСА

У статті наведено розрахунок напруженого стану заглиблених бетонних конструкцій методом скінчених елементів з урахуванням зниження міцності бетону у часі внаслідок підвищеної вологості та під дією агресивного середовища. Запропоновано розв'язання поставленої задачі у випадках різного рівня води у трубах шахтного водосброса.

Ключові слова: агресивне середовище, метод скінчених елементів, міцність бетону, шахтний водоскид

В статье приведен расчет напряженного состояния заглибленных бетонных конструкций методом конечных элементов с учетом снижения прочности бетона во времени, вследствие повышенной влажности и под действием агрессивной среды. Предложено решение поставленной задачи в случаях различного уровня воды в трубах шахтного водосброса.

Ключевые слова: агрессивная среда, метод конечных элементов, прочность бетона, шахтний водосброс

The account of subsurface concrete construction stressed state by finite element method in consideration of loss of concrete strength in time, as a result of high humidity and corrosive medium action is given in this article. Solution of assigned task in the case of different water level in mine spillway is proposed.

Keywords: corrosive medium, finite element method, concrete strength, mine spillway

Для обеспечения длительной безопасной эксплуатации гидротехнических сооружений важное значение имеет состояние железобетонных конструкций. За время срока службы бетон подвергается статическим нагрузкам со стороны грунта, воздействию агрессивных сред (атмосфера, вода), температурным перепадам. За счет влияния этих факторов его первоначальные свойства постепенно ухудшаются.

Бетонные трубы шахтного водосброса находятся на глубине от 0 до 4 м. Сила, действующая на них со стороны грунта, сравнительно не велика. Однако, в результате коррозии бетона и арматуры под действием агрессивной среды и уменьшения прочности вследствие повышенной влажности бетона происходит преждевременное разрушение конструкции. Рассчитаем и проанализируем изменение напряженного состояния заглибленных конструкций, зоны неупругих деформаций шахтного водосброса на протяжении 25 лет его эксплуатации.

Рассмотрим задачу об определении параметров напряженно-деформированного состояния заглибленных конструкций шахтного водосброса (рис. 1).

Как показывают А. В. Александров, В. Д. Потапов, И. В. Баклашов, Б. А. Картозия,

исследования напряженно-деформируемого состояния конструкции, выполняемые методами механики сплошной среды, основаны на совместном решении основных систем уравнений [1, 2]: равновесия; связи между деформациями и перемещениями; уравнений совместности деформаций; физических уравнений состояния, характеризующих зависимость деформаций от напряжений.

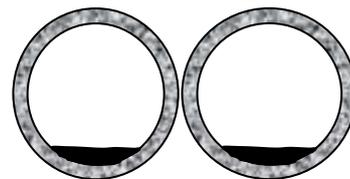


Рис. 1. Заглибленные железобетонные конструкции водопропускного сооружения

Для описания линейно-упругого состояния используются соотношения обобщенного закона Гука:

$$\begin{cases} \varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)), & \gamma_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{G} \\ \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)), & \gamma_{yz} = \frac{\sigma_{yz}}{G} \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E}(\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)), & \gamma_{zx} = \frac{\sigma_{zx}}{G} \end{cases}$$

где ε – нормальные деформации; γ – деформации сдвига; σ – тензор напряжений; E и G – модули упругости при растяжении (сжатии) и сдвиге; ν – коэффициент Пуассона.

Для математического описания процесса перехода горных пород в нарушенное состояние применяется наиболее приемлемая на сегодняшний день теория прочности Кулона-Мора, которая учитывает возможность возникновения разрушения как в результате сдвига, так и в результате отрыва [2, 3]. Особенно широкое применение методы линейной теории упругости получили при численном решении нелинейных задач [4]. При этом упругое решение принимается в качестве первого приближения. Окончательное решение находится путем последовательной корректировки напряженно-деформированного состояния массива горных пород в зависимости от заданных нелинейных характеристик его деформирования.

При решении поставленной задачи по расчету напряженно-деформированного состояния заглубленных бетонных конструкций применяется численный метод решения (метод конечных элементов) [5-7]. Рассматриваемая область делится на конечное число треугольных элементов с узлами $x_i, y_i, x_j, y_j, x_k, y_k$. Между узловыми силами и узловыми перемещениями устанавливается связь:

$$\{F\}_i = K_i \{U\}_i,$$

где $\{F\}_i$ и $\{U\}_i$ – векторы узловых сил и перемещений элемента i ; $[K]_i$ – матрица жесткости этого элемента, $[K] = \int [B]^T [D][B] dV$; $[B]$ – матрица связи между деформациями и перемещениями; $[D]$ – матрица упругости, содержащая характеристики материала, строится на основании соотношений обобщенного закона Гука.

После установления связей для всех элементов области они объединяются в единую модель. Для учета граничных условий все внешние и внутренние силы, граничные значения перемещений приводятся к узлам. Отсутствие перемещений в каком-либо направлении учитывается заданием жестких связей.

В результате решения системы уравнений определяются узловые силы и перемещения для

всей области, а затем они преобразуются в напряжения и деформации в элементах:

$$\begin{aligned} \{\varepsilon\} &= [B]\{u\}, \\ \{\sigma\} &= [D]\{\varepsilon\} + \{\sigma_0\}. \end{aligned}$$

Необходимыми для расчета данными являются физико-механические свойства бетона и вмещающего грунта [8-10].

В табл. 1 показаны значения свойств, которые использовались при расчете.

Таблица 1

Основные свойства бетона и вмещающего грунта

Свойства	Бетон	Грунт
Средняя плотность, кг/м ³	2200	1600
Средняя плотность влажного вещества, кг/м ³	–	1900
Модуль упругости E , МПа	10000	20
Прочность на сжатие, МПа	21	0,03
Прочность на растяжение, МПа	0,09	0,0
Коэффициент Пуассона	0,2	0,4
Отношение прочности в возрасте 21 год к максимальной прочности бетона при хранении на открытом воздухе, %	30	–

Зависимость напряжения-деформации для нелинейных расчетов конструкций показана на рис. 2 [11].

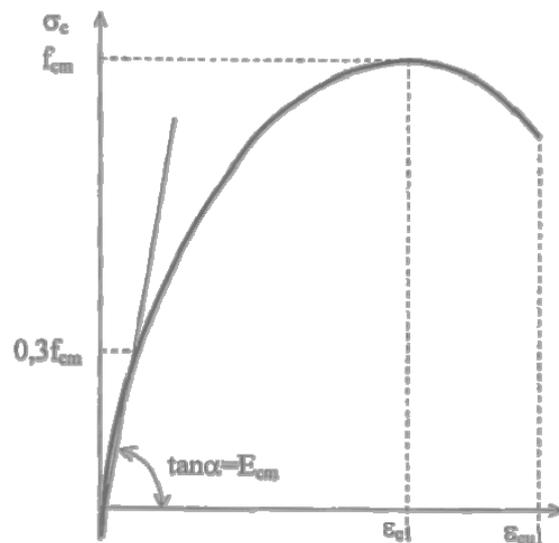


Рис. 2. Схематическое изображение зависимости «напряжения-деформации» для бетона [11]

На схеме обозначено: f_{cm} – среднее значение прочности бетона на сжатие; E_{cm} – среднее

значение начального модуля упругости; σ_c – напряжения сжатия в бетоне; ε_{c1} – деформации сжатия бетона при максимальных напряжениях; ε_{cu} – граничные деформации сжатия бетона.

Природные грунты характеризуются такими свойствами, как осколочность, распределение размера частиц, плотность, пористость, содержание воды, что определяет следующие показатели: сцепление, угол трения, поровое давление [10, 12].

Одним из факторов, оказывающим заметное влияние на прочностные свойства горных пород, является влажность. Насыщение водой наиболее сильное влияние оказывает на породы, содержащие глинистые минералы. При набухании песчано-глинистых пород под влиянием подземных и поверхностных вод пористость растет, прочность падает [13]. Испытания горных пород показали, что изменение влажности размокаемых горных пород изменяет не только их прочностные и деформационные свойства, но и характер поведения после достижения предела прочности [14] (рис. 3).

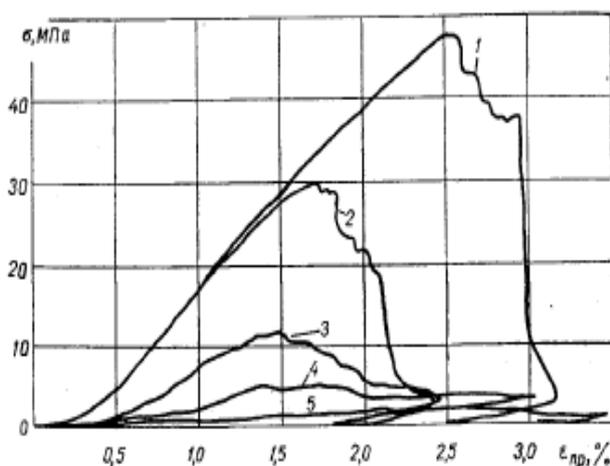


Рис. 3. Диаграммы напряжение - деформация испытания на одноосное сжатие образцов при различной степени увлажнения [14]:

- 1 – $W = 0,5 \%$; 2 – $W = 2 \%$; 3 – $W = 6,2 \%$;
- 4 – $W = 7,9 \%$; 5 – $W = 13,1 \%$

Влажность, а также действие углекислого газа и сульфатов воздействуют и на прочность бетона. В сооружениях, находящихся под действием агрессивных вод с сульфатами кальция, магния и натрия, разрушение проявляется в виде разбухания и искривления конструктивных элементов, происходит не только удаление составляющих из объема цементного камня, но, наоборот, образуются новые соединения, объем которых превышает объем твердой фазы компонентов цементного камня [8, 15, 16]. Увели-

чение объема вызывает растрескивание и расслоение бетона (рис. 4).

Экспериментально подтверждено [9], что с повышением влажности бетона снижается его прочность (рис. 5). Предел прочности при изгибе высохшего бетона ниже, чем этот же показатель в бетоне, находящемся в насыщенном состоянии.

Прочность образцов, испытываемых на сжатие, также увеличивается при высыхании.

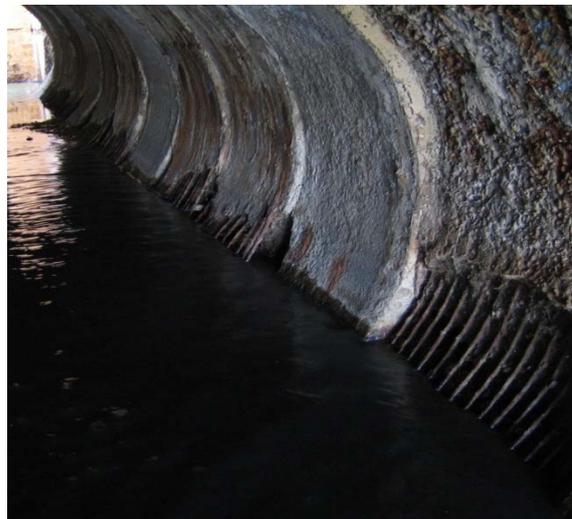


Рис. 4. Разрушение бетона водоотводящих труб

Потеря прочности вследствие увлажнения в бетоне, испытываемом на сжатие, вызывается расширением цементного геля адсорбированной водой: силы сцепления твердых частиц при этом уменьшаются. Наоборот, если при высыхании уменьшается расклинивающее действие воды, прочность бетона увеличивается.

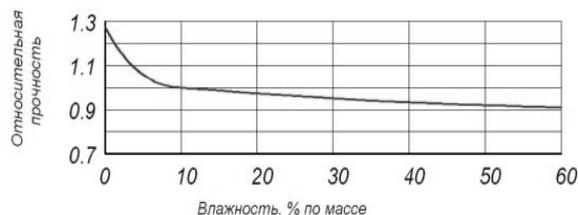


Рис. 5. Изменение относительной прочности бетона в зависимости от его влажности

Проведем расчет параметров НДС заглубленных бетонных конструкций в различные моменты времени эксплуатации с учетом снижения прочности бетона во времени; в результате повышенной влажности и в результате коррозии под действием агрессивной среды. Диаметр трубы – 2,0 м, толщина бетона – 0,2 м. Конечно-элементная сетка для случая уровня воды в трубах шахтного водосброса $U = 1000$ мм показана на рис. 6.

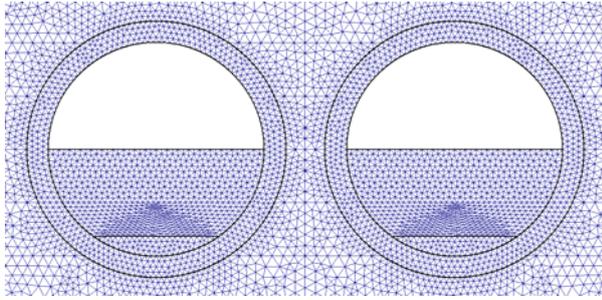


Рис. 6. Центральный фрагмент конечно-элементной сетки

Значения влажности и глубины коррозионного повреждения бетона в различные моменты времени будем брать из данных, полученных в результате численного моделирования процесса диффузионного влагопереноса [17] (рис. 7).

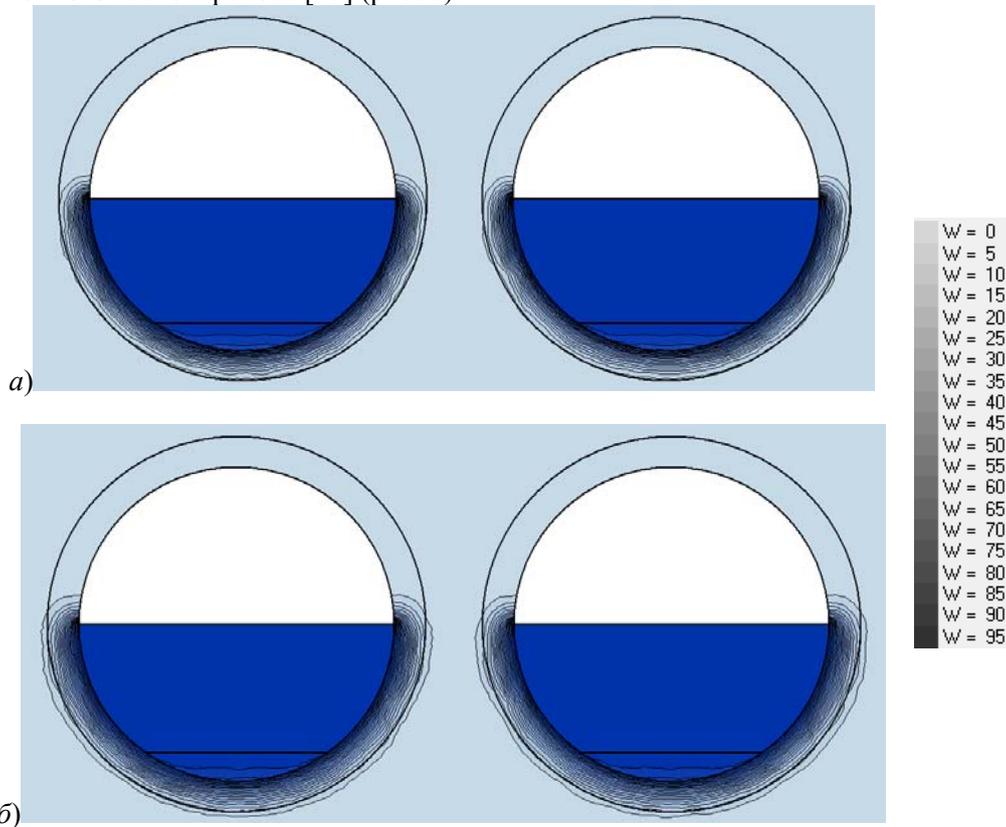


Рис. 7. Влажность бетонной оболочки:
а) – $t = 20$ лет; б) – $t = 40$ лет

Параметр Q характеризует возможность возникновения разрушения в данной точке области.

Распределения значений параметра Q и максимальных напряжений (σ_1) для случая $U = 1000$ мм в момент возведения конструкции, на 20-м и 40-м году эксплуатации показаны соответственно на рис. 8 и 9.

В результате коррозии бетона снижаются его прочностные характеристики. Это приводит

В результате расчетов получим распределения напряжений и зоны неупругих деформаций в исследуемой области в различные моменты времени. Для прогноза и оценки возможности возникновения разрушения рассмотрим параметр, отношение разности наибольших (σ_1) и наименьших (σ_3) главных напряжений к напряжениям от веса вышележащей толщи горных пород:

$$Q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\lambda H},$$

где H – высота вышележащего слоя грунта; ρ – средняя плотность вышележащего грунта.

к возникновению зоны неупругих деформаций на внутреннем контуре бетонного кольца, непосредственно контактирующем с водой (рис. 8, б, в и 9, б, в). Состояние бетона в этой области соответствует участку запредельного деформирования с разупрочнением, в связи с чем значения максимальных напряжений и параметра Q здесь понижаются со временем.

С увеличением зоны разрушения в нижней части бетонной оболочки происходит одновременное снижение максимальных напряжений

на внешнем контуре в ее верхней части и увеличение в грунте между кольцами. Также видно, что максимальные напряжения увеличиваются с глубиной (см. рис. 9).

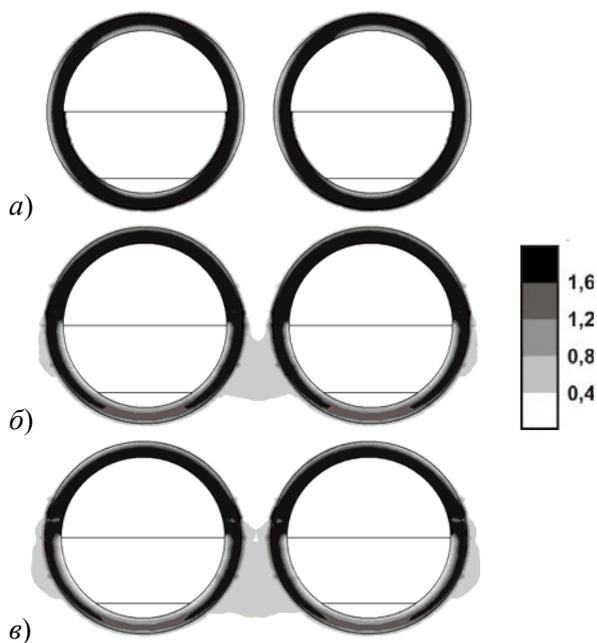


Рис. 8. Значения параметра Q для случая $U = 1000$ мм:
а) $t = t_0$; б) $t = 20$ лет; в) $t = 40$ лет

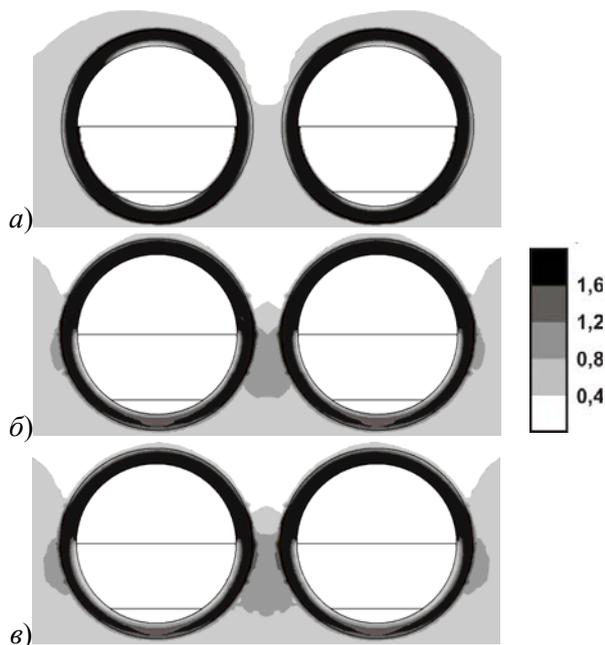


Рис. 9. Значения максимальных напряжений σ_1 для случая $U = 1000$ мм
а) $t = t_0$; б) $t = 20$ лет; в) $t = 40$ лет

Зоны неупругих деформаций для случая $U = 1000$ мм в момент возведения конструк-

ции, на 20-м и 40-м году эксплуатации показаны на рис. 10.

Из рисунков видно, что неупругие деформации развиваются в большей степени в той части бетонной оболочки, которая непосредственно соприкасается с водой.

То есть разрушение конструкции в результате химического воздействия агрессивной среды, повышенной влажности бетона и статической нагрузки от веса самой конструкции и вышележащего грунта происходит в боках труб шахтного водосброса. Именно такой характер разрушения наблюдается в реальных условиях на водопропускных сооружениях ОАО Угольная компания «Шахта «Красноармейская-Западная № 1» [17] (см. рис. 1).

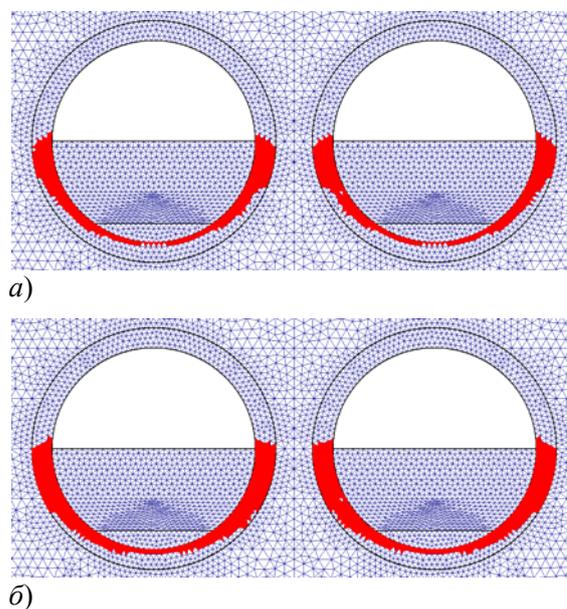


Рис. 10. Зоны неупругих деформаций для случая $U = 1000$ мм:
а) $t = 20$ лет; б) $t = 40$ лет

Построим графики изменения значений параметра Q во времени на уровне поверхности воды вдоль осей $y = 49,59$ м, $y = 49,34$ м и $y = 49,22$ м, соответствующих уровням воды в трубах водоотлива $U = 1,00$ м, $U = 0,50$ м и $U = 0,25$ м (рис. 11, 12 и 13).

На рисунках показаны значения только для левой части схемы, правая является ее зеркальным отображением. При этом $x = 48,62$ м; $x = 50,00$ м – координаты центра трубы.

Пиковые значения параметра Q (см. рис. 11-13), соответствуют участкам стенок бетонной трубы, которые имеют гораздо более высокую прочность, чем вмещающий грунт (см. табл. 1), способны выдерживать большую

нагрузку и характеризуются высокими напряжениями.

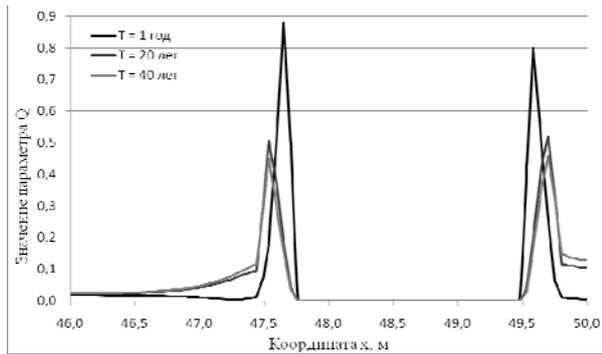


Рис. 11. Изменение значений параметра Q во времени на уровне поверхности воды вдоль оси $y = 49,59$ м ($y = 50,00$ м – центр трубы) при $U = 1,00$ м

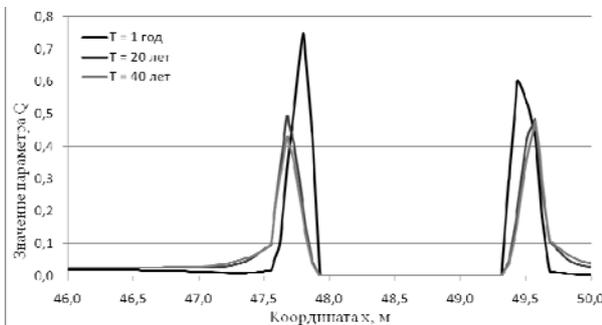


Рис. 12. Изменение значений параметра Q во времени на уровне поверхности воды вдоль оси $y = 49,34$ м ($y = 50,00$ м – центр трубы) при $U = 0,50$ м

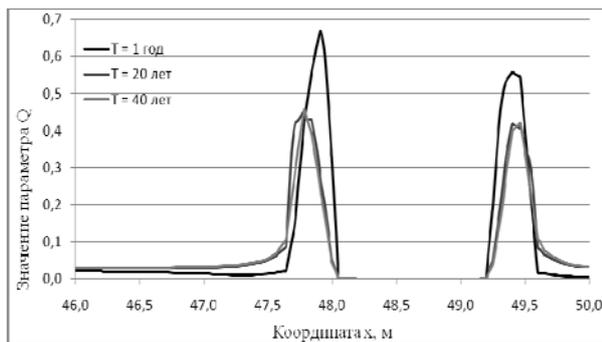


Рис. 13. Изменение значений параметра Q во времени на уровне поверхности воды вдоль оси $y = 49,22$ м ($y = 50,00$ м – центр трубы) при $U = 0,25$ м

Участки с минимальными значениями Q , например участок кривой на промежутке $x \in [47,80; 49,44]$ на рис. 11, соответствуют

внутреннему пространству трубы, заполненному водой.

При увеличении времени эксплуатации водопропускных сооружений в результате химического воздействия агрессивной среды и повышенной влажности бетона снижаются прочностные характеристики бетона, что приводит к возникновению зон неупругих деформаций на внутреннем контуре бетонных труб, непосредственно контактирующем с водой. Состояние бетона в этой области соответствует участку запредельного деформирования с разупрочнением, в связи с чем значения максимальных напряжений и параметра Q здесь понижаются со временем. Хорошо видно, что в стенках бетонной трубы со временем не только понижаются пиковые значения параметра Q , но и уменьшается угол наклона кривой на внутреннем контуре. Это связано с разрушением, расслоением бетона на внутренней поверхности трубы.

Полученные результаты расчета напряженного состояния заглубленных бетонных конструкций шахтного водоотлива можно использовать для расчета фильтрационной проницаемости оболочек с целью определения параметров фильтрации воды из труб водоотлива во вмещающий грунт, таких как скорости фильтрации, расход жидкости, вытекающей через поврежденные трубы, а также вероятное расположение полостей, вымываемых водой за контурами бетонных оболочек.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров, А. В. Основы теории упругости и пластичности [Текст] / А. В. Александров, В. Д. Потапов. - М.: Высш. шк., 1990. - 400 с.
2. Баклашов, И. В. Механика подземных сооружений и конструкций крепей [Текст] / И. В. Баклашов, Б. А. Картозия - М.: Недра, 1984. - 415 с.
3. Надаи, А. Пластичность и разрушение твердых тел [Текст] / А. Надаи. - М.: Мир, 1969. - Т. 1. - 648 с.
4. Круковский, А. П. Обзор существующих методов расчета напряженно-деформированного состояния и устойчивости массива горных пород [Текст] / А. П. Круковский, В. В. Круковская // Геотехническая механика: Сб. научн. тр. / НАН Украины ИГТМ. - Днепропетровск, 2002. - № 36. - С. 178-186.
5. Амусин, Б. З. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики [Текст] / Б. З. Амусин, А. Б. Фадеев. - М. Недра, 1975. - 144 с.

6. Фадеев, А. Б. Метод конечных элементов в геомеханике [Текст] / А. Б. Фадеев. – М.: Недра, 1987. – 224 с.
7. Сегерлинд, Л. Применение метода конечных элементов [Текст] / Л. Сегерлинд. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
8. Овчинников, В. В. Химия в строительстве [Текст] / В. В. Овчинников // Соросовский образовательный журнал – Казань: Казанская государственная архитектурно-строительная академия, 2000. – № 5. – С. 52-56.
9. Невилль, А. М. Свойства бетона [Текст] / А. М. Невилль / Пер. с англ. В. Д. Парфенова и Т. Ю. Якуб. – М.: Стройиздат, 1972. – 344 с.
10. Балсон, Ф. С. Заглубленные сооружения: статическая и динамическая прочность [Текст] / Ф. С. Балсон. – М.: Стройиздат, 1991. – 240 с.
11. ДБН В2.6-31:2006. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст] / Державні будівельні норми України. – К.: Мінрегіонбуд України, 2006. – 90 с.
12. Whitman, R.V. The Response of Soils to Dynamic Loading [Текст] / R.V. Whitman.. – US Army Waterways Experiment Station, 1970. – P. 3-26.
13. Мироненко, В. А. К вопросу об изменении механических свойств песчано-глинистых пород в бортах карьеров под влиянием подземных и поверхностных вод [Текст] / В. А. Мироненко, И. Г. Котов // Формирование и изменение физ.-мех. свойств горных пород под влиянием естественных и искусственных факторов (геологических процессов, инженерных сооружений и горных работ) / Тезисы докладов. – Ленинград, 1966. – С. 243-250.
14. Виноградов, В. В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок [Текст] / В. В. Виноградов. – Киев: Наук. думка, 1989. – 192 с.
15. Галат, В. В. Оценка остаточного ресурса противокоррозионных свойств бетона гидротехнических объектов [Текст] / В. В. Галат, А. Г. Синякин, Ю. А. Спириин, В. Л. Чернявский // Гідроенергетика України, 2006. – № 4. – С. 49-52.
16. Круковская, В. В., Диффузионный влагоперенос в пористой структуре заглубленных бетонных конструкций [Текст] / В. В. Круковская, А. П. Круковский, С. Д. Гребенюк, Ю. А. Виноградов // Геотехническая механика: сб. научн. тр. / НАН Украины ИГТМ. – Днепропетровск, 2010. – № 90. – С. 86-95.
17. Гребенюк, С. Д. Проблеми гірського тиску [Текст] / С. Д. Гребенюк, В. В. Круковская. – Донецьк: ДонНТУ, 2010. – № 18. – С. 167-179.
18. Выполнить геофизическое обследование технического состояния шахтного водосброса верхнего и нижнего прудов шахтоуправления «Покровское» / Отчет о научно-исследовательской работе. – Днепропетровск, 2008. – 57 с.

Поступила в редколлегию 15.10.2011.
Принята к печати 10.11.2011.