

существующими правилами разведанные запасы пресных подземных вод оцениваются и утверждаются на 25 лет эксплуатации. Для ряда водозаборов этот срок истёк, и необходимо провести переоценку и переутверждение запасов подземных вод на действующих водозаборах с учётом имеющегося опыта их эксплуатации.

Приведенные выше результаты оценок — ориентировочные и характеризуют в основном масштаб события, однако они свидетельствуют о не-

обходимости прогноза численности населения крупных и средних городов Российской Федерации на ближайшую и отдаленную перспективу, а также разработки мероприятий по созданию резервных источников водоснабжения городов, не обеспеченных утвержденными запасами подземных вод в условиях ЧС как в современных условиях, так и в перспективе.

Статья выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ № 14-17-00791.

ЛИТЕРАТУРА

1. Боровский Б.В. и др. Состояние проблемы изучения и оценки ресурсов пресных подземных вод // Подземный сток и ресурсы пресных подземных вод. М.: Науч. мир, 2013. С. 21–25.
2. Боровский Б.В., Данилов-Данильян В.И., Зекцер И.С., Палкин С.В. Использование пресных подземных вод для улучшения водообеспеченности городского населения // Сб. науч. тр. Всерос. науч. конф. «Устойчивость водных объектов, водосборных и прибрежных территорий; риски их использования». Калининград: Каприс, 2011. С. 55–62.
3. Данилов-Данильян В.И., Зекцер И.С. Ресурсы подземных вод и возможности их использования в Арктической зоне России. Современные производительные силы. От догоняющего к опережающему развитию. К 100-летию Совета по изучению производительных сил // Спецвыпуск: Арктика. Стратегия и приоритеты развития. М.: СОПС, 2015, № 3. С. 103–112.
4. ГОСТ 22.3.006-87 В «Система стандартов Гражданской обороны СССР. Нормы водообеспечения населения». Режим доступа: [http://prokvo.ru/load/gosty/gost_223006_87_v_quot-sistema_standartov_grazhdanskoj_oborony_sssr_normy_vodoob-espechenija_naselenijaquot/11-1-0-219] — дата обращения: 20.04.2015.
5. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2014 году». М.: Министерство природных ресурсов и экологии, 2015. Режим доступа: [http://www.mnr.gov.ru/upload/iblock/b27/gosdoklad_2015.pdf] — дата обращения: 14.12.2015.
6. Зекцер И.С., Каримова О.А., Четверикова А.В. Ресурсы пресных подземных вод России и их использование в чрезвычайных ситуациях // Водные ресурсы. 2015. Т. 42. № 4. С. 351–366.
7. Зекцер И.С. Подземный сток и ресурсы пресных подземных вод. Современное состояние и перспективы использования в России. М.: Науч. мир, 2012. 428 с.
8. Зекцер И.С. Подземные воды как компонент окружающей среды. М.: Науч. мир, 2001. 327 с.
9. Информационный бюллетень Федерального агентства по недропользованию о состоянии недр на территории Российской Федерации в 2013 г. Вып. 37. М.: ООО «Геоинформмарк», 2014. 226 с.
10. Подземные воды мира: ресурсы, использование, прогнозы / Под ред. И.С. Зекцера М.: Наука, 2007. 437 с.
11. Свод Правил 31.13330.2012. «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения». Water supply. Pipelines and portable water treatment plants. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84. Режим доступа: [http://docs.cntd.ru/document/1200093820] — дата обращения: 04.09.2015.
12. Статистика населения с основами демографии / Г.С. Кильдышев, Л.Л. Козлова, С.П. Ананьева. М.: Финансы и статистика, 1990. 312 с.
13. Water Resources of the United States режимдоступа: [http://www.usgs.gov/water/] — дата обращения: 15.12.2015.

УДК 624.191.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА

Е.Ю. КУЛИКОВА

Горный институт НИТУ «МИСЦ»
119991, Россия, г. Москва, Ленинский просп., 6; e-mail: fragrante@mail.ru

Представлена методика, позволяющая на основе комплексных исследований прочностных и фильтрационных характеристик несущих конструкций подземных сооружений решить задачи выявления условий образования дефектов и наметить мероприятия по повышению качества бетонных обделок. Для определения возможных пределов изменения водонепроницаемости бетона несущих конструкций подземных сооружений определено отклонение величины коэффициента фильтрации бетона от средней величины или коэффициент вариации. Найденный коэффициент вариации позволяет определить расчётную величину коэффициента фильтрации, которая должна закладываться в фильтрационный расчёт обделок. Чем выше величина коэффициента вариации, тем неоднороднее обделка, тем выше вероятность образования течи. Выявлены зоны, где обделка будет фильтровать воду из-за недостаточной плотности, и безопасная в этом отношении зона

Ключевые слова: прочность; фильтрация; фильтрационная надёжность; пространство; течь; подземное сооружение; математическая статистика.

DETERMINATION OF FILTRATION CHARACTERISTICS OF CONCRETE STRUCTURES OF THE UNDERGROUND CONSTRUCTIONS ON THE BASIS OF THE MONITORING DATA

E YU. KULIKOVA

*Mining Institute of National University of Science and Technology MIS&S
119991, Russia, Moscow, Leninsky prospekt, 6; e-mail: fragrant@mail.ru*

The paper presents a methodology based on the integrated studies of the strength and filtration characteristics of the underground supporting structures to solve the problem of identification of the conditions, favorable for the formation of the defects in their supporting structures and to propose measures to improve the quality of the concrete linings. To identify the potential variability of the water permeability of the concretelinings the deviation of the coefficient of filtration of the concrete from an average value, or the coefficient of variation, is found. The coefficient of variation allows determining the calculated value of the coefficient of filtration, which should be included in the lining design. The higher the value of the coefficient of variation is, the more heterogeneous lining is and the higher the probability of a leak is. The areas where the lining will be filter the water because of an insufficient density are identified, as well as areas, which are safe in this respect.

Key words: strength; filtration; filtration reliability; space; leak; underground structure; mathematical statistic.

Грунтовые воды, с одной стороны, являются ценным природным ресурсом, с другой — могут быть причиной ухудшения функционирования многих народно-хозяйственных объектов. Особенно актуальна эта проблема применительно к освоению городского подземного пространства.

Настоящий этап развития городов мира характеризуется активным освоением подземного пространства для размещения транспортных и инженерных систем, объектов торговли, промышленности, хранилищ и автостоянок, многофункциональных подземных комплексов и др. В РФ общий объём проведения только подземных коммуникаций составляет порядка 200—250 км в год, из них 75—80 км в год приходится на Москву [8]. Однако большинство подземных сооружений в городах не соответствуют проектному уровню долговечности. Зачастую конструкции подземных сооружений отличаются плохой ремонтпригодностью, что связано с недостаточной фильтрационной надёжностью конструкций.

Количественная характеристика фильтрационной надёжности, представляющая собой вероятность появления отказов $Q(t)$, определяется по статистическим значениям коэффициентов фильтрации обделок или их участков:

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N_0}. \quad (1)$$

Надёжность или вероятность безотказной работы конструкций подземного сооружения $P(t)$ определяется следующим образом:

$$P(t) = 1 - \frac{n(t)}{N_0}, [n(t) \leq N_0], \quad (2)$$

где $n(t)$ — число показателей коэффициента фильтрации бетонной обделки, превышающее предельное значение K_6 при работе подземного сооружения в течение исследуемого отрезка времени t ; N_0 — общее число показателей; $P(t)$ — вероятность безотказной работы обделки подземного сооружения.

Для исследования характеристик надёжности бетонных и сборных железобетонных обделок подземных сооружений используются данные мониторинга, проводимого на подземных объектах строительными лабораториями. Нами использовались данные мониторинга водонепроницаемости монолитных бетонных обделок более 10 коммунальных тоннелей с внутренними диаметрами 2,5; 3,6 и 4 м (общей протяженностью 15 км) и более 70 сборных железобетонных конструкций, используемых в городском подземном строительстве г. Москвы.

Для получения достоверных результатов сведения о плотности монолитных обделок и сборных железобетонных элементов крепи, полученные с помощью ультразвукового импульсного метода контроля, сравнивались с аналогичными показателями образцов, отобранных при бетонировании или вырубленных из конструкций.

Исследовались обделки из бетона марки М300 (класс прочности В40) и М400 (класс прочности бетона В55), сооружаемые в металлической или деревометаллической опалубке с укладкой бетонных смесей механизированным способом (с помощью бетононасосов).

Чтобы исключить влияние на результаты контроля условий производства работ по возведению обделки использованы данные о водонепроницаемости обделок тоннелей диаметром 3,6 и 4,0 м в свету (табл. 1).

В собранном материале в ряде случаев отсутствовали сведения о коэффициенте фильтрации K_6 , поэтому его значения рассчитывались по эмпирическим формулам Мепуришвили:

$$n = 8,5 - 0,0093 V \quad \%, \quad (3)$$

$$K_6 = K_0 n, \quad (4)$$

где n — пористость бетона; V — скорость ультразвука при поверхностном прозвучивании, м/с; K_0 — начальный коэффициент фильтрации воды через бетон, по В.В. Стольникову, для бетонов марки W 8, равный $K_0 = 2 \cdot 10^{-7}$ см/с.

Таблица 1

Результаты ультразвукового обследования обделок на водонепроницаемость

Тоннель диаметром 4 м					Тоннель диаметром 3,6 м				
$K_6 \cdot 10^{-5}$, м/сут.					$K_6 \cdot 10^{-5}$, м/сут.				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,97	1,6	1,4	4,2	0,864	1,5	1,6	1,4	1,4	0,95
1,38	1,3	1,3	0,5	1,3	1,6	1,5	1,6	1,5	0,865
1,55	1,7	1,3	0,95	0,4	1,6	1,4	1,6	1,4	0,77
2,67	1,7	1,5	1,6	1,2	1,8	1,2	1,6	1,9	0,864
3,02	1,6	1,2	1,38	0,95	1,6	1,5	1,3	1,4	0,95
1,6	1,9	1,4	1,3	1,3	1,6	1,6	1,3	0,7	0,77
2,8	1,9	1,2	1,3	0,95	1,8	1,6	1,6	1,12	0,4
2,2	1,8	1,6	1,3	1,12	1,7	1,7	1,2	1,03	0,64
2,9	1,5	1,4	1,03	1,864	1,2	1,3	1,3	0,4	0,864
2,4	1,7	1,6	1,03	1,864	1,3	1,52	0,95	1,03	0,7
2,5	1,9	1,9	1,03	0,4	1,5	1,7	1,8	0,77	1,5
1,9	1,5	1,6	1,03	0,863	1,7	1,4	1,5	0,95	1,4
1,6	0,8	1,2	0,95	0,5	1,6	1,3	1,12	0,95	1,38
1,9	1,4	1,6	1,2	0,5	1,8	1,4	1,03	0,864	0,7
2,1	1,5	1,38	1,3	0,6	1,5	1,4	1,5	0,95	1,03
1,7	1,4	1,38	1,12	1,2	1,4	1,3	1,7	0,77	1,12
1,9	1,6	1,5	1,98	0,7	1,5	1,3	1,7	0,95	0,77
1,6	1,4	1,38	0,864	0,6	1,5	1,4	1,103		

Результаты определения K_6 по предложенным формулам приводятся в табл. 2.

Чтобы исключить существенные расхождения между показателями водонепроницаемости бетона сборных элементов обделок подземных сооружений, полученными ультразвуковым методом (табл. 2) и результатами испытаний водонепроницаемости образцов бетона, вырубленного из обделок, построена тарировочная зависимость [7].

Результаты определения K_6 элементов обделок по этой зависимости, приведённые в табл. 3, сравнивались с данными табл. 2 для оценки достоверности полученных результатов.

Приведённые в табл. 1—3 совокупности данных были подвергнуты статистической обработке для построения кривых распределения K_6 для исследуемых конструкций.

$$M = \frac{mx_i}{n}; \quad (5)$$

$$\sqrt{\frac{m(x_i - M)^2}{n - 1}}; \quad (6)$$

$$h = \frac{K_{a \max} - K_{a \min}}{1,3211 \lg n}, \quad (7)$$

где M — математическое ожидание; σ — среднее квадратичное отклонение; n — число измерений; x_i — середина интервала; m — частота попадания в интервал; h — величина интервала.

Результаты проведённых расчётов для монолитной и сборной обделок приведены в табл. 4.

Для определения возможных пределов изменения водонепроницаемости бетона несущих конструкций подземных сооружений было найдено отклонение величины коэффициента фильтрации бетона от средней величины или коэффициент вариации C_v :

$$C_v = \frac{\sigma}{K_6}. \quad (8)$$

Таблица 2

Расчётные характеристики водонепроницаемости для сборных обделок

V , м/с	$K_6 \cdot 10^{-5}$, м/сут.	V , м/с	$K_6 \cdot 10^{-5}$, м/сут.	V , м/с	$K_6 \cdot 10^{-5}$, м/сут.	V , м/с	$K_6 \cdot 10^{-5}$, м/сут.
4433	345,6	4320	544,2	4114	743,0	4390	323,3
4448	319,7	4190	777,6	4200	488,8	4250	430,7
4497	302,4	4240	717,2	4200	760,3	4390	423,3
4386	432,0	4265	665,3	4280	630,7	4233	743,0
4434	345,6	4250	618,4	4270	648,0	4280	630,7
4450	388,8	4390	423,3	4290	622,1	4270	648,0
4375	540,0	4960	501,1	4260	656,6	4435	345,6
4314	345,6	4490	216,0	4242	717,2	4520	274,0
4260	561,6	4430	345,6	4300	622,1	4525	673,9
4470	267,8	4350	518,4	4480	172,8	4375	540,0
4390	423,3						

Таблица 3

Характеристики водонепроницаемости сборных обделок по результатам испытаний

V , м/с	K_6 10^{-5} , м/сут.	V , м/с	K_6 10^{-5} , м/сут.	V , м/с	K_6 10^{-5} , м/сут.
6390	2,89	4256	1,95	4219	1,164
4202	2,33	4310	1,77	4219	1,82
4237	2,25	4237	2,25	4237	2,25
4348	1,65	4387	1,32	4374	1,85
4255	2,33	4425	0,83	4367	0,13
4184	2,73	4237	1,32	4293	1,91
4202	2,33	4219	1,85	4386	1,2
4274	1,85	4274	1,85	4167	2,54
4386	1,32	4405	1,27	4367	1,54
4329	1,75	4405	1,27	4167	2,54
4149	2,65	4274	1,99	4329	1,77
4167	2,54	4378	1,66	4405	1,27
4378	1,65	4386	1,32	4348	1,65
4237	2,25	4444	1,06	4348	1,65
4922	1,91	4444	1,06	4219	2,33
4202	2,33	4274	1,35	4348	1,65
4149	2,65	4367	1,54	5385	1,2
4149	2,65	4405	1,27	4465	0,99
4310	1,77	4405	1,27	4405	1,27
4367	1,54	4386	1,32	4374	1,85
4292	1,91	4255	2,06	4310	1,77
4292	1,91	4237	1,32	4426	1,19
4405	1,27	4444	1,06	4425	1,19
4273	1,85	4348	1,66	4274	1,85
4386	1,32	4255	1,95	4310	1,74
4237	2,25	4329	1,77	4425	1,19
4426	1,19	4444	1,06		

Таблица 4

Результаты статистического расчета для сборных и монолитных обделок

Интервал	x_i 10^{-5}	n	$(m x_i)$ 10^{-5}	M 10^{-5}	$(x_i - M)$ 10^{-5}	$(x_i - M)^2$ 10^{-5}	$m (x_i - M)^2$ 10^{-5}	10^{-5}
Монолитная обделка диаметром 4 м								
0,4—0,75	0,58	8	4,60	1,44	-0,86	0,74	5,92	0,54
0,76—1,1	0,93	15	14,03		-0,51	0,26	3,9	
1,12—1,47	1,30	27	34,85		-0,15	0,02	0,54	
1,48—1,83	1,66	22	36,41		0,22	0,05	1,10	
1,84—2,19	2,02	9	16,30		0,62	0,38	3,42	
2,20—2,55	2,38	4	9,5		0,94	0,88	3,52	
2,56—2,91	2,74	3	8,21		1,30	1,69	5,07	
2,92—3,27	3,10	1	3,09		1,66	2,76	2,76	
е		89	128,9		3,22	6,78	26,01	
Монолитная обделка диаметром 3,6 м								
0,40-0,60	0,50	2	1,00	1,3	-0,8	0,64	1,28	0,30
0,61-0,81	0,71	6	4,26		-0,59	0,35	0,36	
0,82-1,02	0,92	10	9,20		-0,39	0,14	1,40	
1,03-1,23	1,13	15	16,25		-0,17	0,03	0,45	
1,24-1,44	1,34	21	28,14		0,04	0,002	0,04	
1,45-1,65	1,55	22	34,1		0,25	0,06	1,32	
1,66-1,86	1,76	12	21,12		0,46	0,21	2,52	
1,87-2,07	1,87	1	1,97		0,57	0,32	0,32	
е	89	115,74			1,752	7,69		
Сборная обделка								
0,13-0,62	0,38	1	0,38	1,72	-1,34	1,80	1,80	0,53
0,63-1,01	0,82	2	1,64		-0,90	0,81	1,62	
1,02-1,40	1,21	25	30,25		-0,51	0,26	6,50	
1,41-1,79	1,60	18	28,80		-0,12	0,014	0,25	
1,80-2,18	1,99	16	31,84		0,27	0,07	1,12	
2,19-2,56	3,37	13	30,81		0,65	0,42	5,46	

Таблица 5

Расчётные значения коэффициента фильтрации

$K_6 \cdot 10^{-5}$, м/сут.	$\delta \cdot 10^{-5}$	C_v	$K_{фр} \cdot 10^{-5}$, м/сут.
Монолитная обделка			
1,44	0,54	0,40	0,864
1, 3	0,30	0,26	0,962
Сборная обделка			
1,72	0,53	0,31	1,187

Найденный коэффициент вариации позволяет определить расчётную величину коэффициента фильтрации $K_{фр}$, которая должна закладываться в фильтрационный расчет обделок (табл. 5):

$$K_{фр} = K_6(1 - C_v). \quad (9)$$

Чем выше величина C_v , тем неоднороднее обделка и выше вероятность образования течи.

Принимая $m_1 \equiv N_0$; $m_2 \equiv n(t)$, по формуле (2) найдём вероятность течей в выбранных обделках для подземного и открытого способов строительства при различных значениях напора подземных вод.

Полученные при обработке данных мониторинга результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Фильтрационная надёжность монолитных бетонных обделок действующих подземных сооружений не отвечает уровню требований по влажностным условиям при работе объекта.

2. Вероятность образования течей при низких напорах подземных вод (0—0,15 МПа) соответствует уровню 0,1—0,23. При напоре вод, превышающем 0,15 МПа, эта вероятность резко увеличивается, приближаясь к 1 при давлении порядка 0,5 МПа.

3. Вероятность образования течей $Q(t)$ для элементов сборных железобетонных обделок равна 1 при напоре подземных вод выше 0,025 МПа, что объясняется образованием значительного числа пор большого диаметра при обработке бетонных элементов пропариванием.

Таким образом, представленная методика использования данных мониторинга бетонных обделок комплексно решает задачи выявления условий образования дефектов в несущих конструкциях подземных сооружений, позволяет объяснить причины образования зоны течи в горизонтальных выработках и наметить мероприятия по повышению качества бетонных обделок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коллинз Р. Течение жидкости через пористые тела. М.: Мир, 1964. 215 с.
2. Колотилкин В.М. Проблемы долговечности и надежности жилых зданий. М.: Знание, 1969. С. 33—39.
3. Коржук А.Н. О расчете прочности и водонепроницаемости бетонной крепи шахтных стволов // Горное давление и крепь вертикальных стволов. М.: Стройиздат, 1975. С. 18—24.
6. Котляр С.Р. Исследование и разработка ультразвукового метода приемочного контроля качества железобетонных элементов крепи и обделок коллекторных тоннелей. Дис. ... канд. тех. наук. М.: МГИ, 1975. 187 с.
7. Куликов Ю.Н., Куликова Е.Ю., Хажеинов К.В. Долговечность ограждающих конструкций подземных сооружений. М.: Изд-во «Мир горной книги», 2009. 317 с.
8. Теличенко В.И. «Критические технологии в строительстве» // «Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века». Январь 1999. № 1. С. 29—32.

УДК 556.314:541.1

ПРОЦЕССЫ ИОНООБМЕННОЙ АДСОРБЦИИ В ГИДРОСТРАТИСФЕРЕ

В.Г. ПОПОВ¹, Р.Ф. АБДРАХМАНОВ²

¹Южно-Российский государственный политехнический университет
(Новочеркасский политехнический институт) им. М.И. Платова
346428, Россия, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132; e-mail: popovvg@novoch.ru

²Институт геологии Уфимского научного центра РАН
470000, Россия г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2; e-mail: hydro@ufaras.ru

На базе натурных и экспериментальных литолого-гидрогеохимических исследований, выполненных в Волго-Уральском седиментационном бассейне, выдвинут ряд принципиальных положений, касающихся механизма и кинетики процессов катионного обмена в гетерогенной системе вода—порода. Установлено, что они носят зональный характер и дифференцированы по глубине бассейна. Наиболее значимы ионообменные взаимодействия для верхней части зоны гипергенеза (до 300 м), сложенной верхнепермскими глинистыми осадками с высокими адсорбционными свойствами. Здесь отмечена коренная метаморфизация состава подземных растворов и образование пресных гидрокарбонатных натриевых и солёных сульфатных натриевых вод. В зонах ката- и метагенеза на глубинах более 1000—1500 м вследствие перестройки структуры глинистых минералов в ряду монтмориллонит—гидролюда—хлорит резко снижается ёмкость поглощенного