© Е.Ю. Куликова, 2007

УДК 69.035.4

Е.Ю. Куликова

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ОБРАЗОВАНИЯ ТЕЧЕЙ В НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Образование течей и «свищей» в бетонных обделках подземных сооружений связано с локальной неплотностью бетона, которая характеризуется его водонепроницаемостью. Известно [1], [2], что водонепроницаемость бетона зависит более чем от 14 факторов, среди которых основным является степень и характер пористости материала, в свою очередь, зависящая от водно-цементного отношения (*В/Ц*). Считается, что чем крупнее поры, тем проницаемее бетон. Так, по данным работ [3], [4], увеличение диаметра пор в горных породах или бетонах на один порядок ведет к увеличению количества протекающей по ним жидкости в 10000 раз, то есть это количество, согласно уравнению Пуайзеля для фильтрации пропорционально радиусу пор в четвертой степени. В сложной системе пор бетона [5] этот эффект ниже, что подтверждается данными табл. 1, составленной на основе работы [6]. Для составления таблицы исследовался бетон состава 1:2,1:3,12 с расходом цемента 350 кг на 1 м^3 нормально-влажностного твердения. Объем и величина пор в образцах были определены методом ртутной порометрии.

Полученные данные показали, что с увеличением *В/Ц* бетона в 1,75 раз его водонепроницаемость ухудшается в 2,45 раз. В то же время наблюдается снижение мелкой пористости от 62 до 45 % за счет увеличения объема средней (с 27 до 41 %) и крупной (с11 до 14 %) пористости. Интересно, что изменение водонепроницаемость бетона в 2,45 раза происходит при изменении среднего радиуса пор с 4,53 мк (*В/Ц* = 0,4) до 5,71 мк (*В/Ц* = 0,7), т.е. в 1,26 раз. Тем самым подтверждается положение о более низком эффекте изменения проницаемости бетона при изменении радиуса пор.

Явление изменения водонепроницаемости локальных участков бетона при изменении *В/Ц* исследованы для бетона подземных сооружений. Так, Болховитинов [4] в полупромышленном и промышленном экспериментах показал, что капеж и прерывистые струи подземных вод сильно изменяют водонепроницаемость отдельных участков бетонов крепи горных выработок в отрицательную сторону. Аналогичные результаты содержатся в работах Ю.Д. Снегирева [4], В.М. Мосткова [7] и др. Принимая вывод о значительном влиянии добавочной (за счет капежа) влаги на локальную водонепроницаемость бетонных крепей, следует учитывать, что даже в лабораторных образцах имеют место неплотности, аналогичные вышеупомянутым.

При образовании подобных неплотностей наряду с мелкими порами гелевой составляющей цементного камня в структуре бетона образуются поры и каналы, иногда с сечением в 1-2 порядка превосходящим сечение каналов цементного камня [3].

Таблица 1

Средний диаметр пор, мм	**Водоцементное отношение** $\frac{В/Ц}{\%}$		
	0,4/100	**0,65/100**	**0,7/175**
	Коэффициент фильтрации $\frac{K_ф \cdot 10^{-6}}{\%}$**, м/с**		
	1,6/100	**3,14/196**	**3,9/245**
	Объем пор $V \cdot 10^2$**,** $\frac{м^3/г}{\%}$		
22,13	0,31/11	0,53/15	0,72/14
5,13	0,77/27	1,09/32	2,24/41
1,14	1,73/62	1,89/53	2,47/45
Суммарный объем пор в образце, $V \cdot 10^2$, $м^3/г$	2,81/100	3,51/125	5,44/194

Так, например, опыты М.К. Шарова-ра на тщательно подготовленных лабораторных образцах бетона высокого класса (В 45 – В 60) диаметром 300 мм наглядно продемонстрировали, что примерно в 40 % образцов имеются сосредоточенные каналы фильтрации (течи). На тот же эффект указывают работы [2], [5].

Таким образом, наличие сосредоточенных каналов в бетоне, как органически присущих ему дефектов, является посылкой к образованию течей и «свищей» в бетонных обделках подземного сооружения. Количественная оценка вероятности образования подобных дефектов бетона в рассмотренных литературных источниках практически не рассмотрена.

Сосредоточенные каналы развиваются в «свищи» под воздействием фильтрации подземных вод и выщелачивающей коррозии (коррозии I вида) [3]. Механизм этой коррозии, вскрытый в работах В.М. Москвина [8], В.В. Кинда [9] и др., заключается в растворении гидроксида кальция $Ca(OH)_2$ фильтрующейся водой и вымывании его из бетона. Количество $Ca(OH)_2$ в портландцементном камне после 1 месяца твердения составляет 9-11 %, после 3-х месяцев – достигает 15 % массы цемента [10]. Вымывание $Ca(OH)_2$ фильтрующей водой приводит к нарушению равновесия в системе «продукты гидратации – вода» и, в конечном итоге, к разрушению цементного камня. Так, белит ($2CaO \cdot SiO_2 \cdot aq$) вполне устойчив лишь в насыщенном растворе $Ca(OH)_2$, силикат ($3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot aq$) – в растворах, содержащих не менее 1,1 кг CaO в 1 л, а гидроалюминат кальция ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$) находится в равновесии с раствором, содержащим 1,15 г/л гидроксида кальция. Четырехкальцевый гидроферрит может существовать только при концентрации CaO в жидкой фазе не ниже 1,06 г/л. При снижении концентрации $Ca(OH)_2$ в растворе указанные составляющие цементного камня разлагаются с потерей вяжущих свойств, что ведет к образованию сквозного отверстия – «свища».

Анализ условий возникновения коррозии I вида позволяет выявить важнейшие из них – допустимый коэффициент фильтрации воды через бетон [3]. Зная значение коэффициента фильтрации и такие величины, как количество извести, которое может быть удалено из единицы объема бетона без потери им основных технических свойств $q_{изв}$, $г/см^3$, количество воды, фильтрующей через единицу объема бетона в единицу

времени (объемную скорость воды) $V_{об}$, см^3/(см^3·с), среднюю концентрацию извести в воде $C_{изв}$, можно определить продолжительность службы τ конструкции, ее элемента или сооружения:

$$\tau = \frac{q_{изв}}{V_{об} \cdot C_{изв}}, \qquad (1)$$

а из формулы [3]:

$$q_{изв} = K \cdot Ц \cdot \alpha, \qquad (2)$$

где K – заданный допустимый процент выщелачивания извести; $Ц$ – содержание цемента, г на 1 см^3 бетона или кг/л; α – содержание CaO в цементе, доли единицы.

Согласно закону Дарси

$$V_{об} = K_ф \cdot \Delta H, \qquad (3)$$

где $\Delta H = \frac{H}{\alpha}$ – градиент напора.

Тогда допустимый коэффициент фильтрации бетона может быть представлен как

$$K_ф = \frac{V_{об}}{\Delta H}, \qquad (4)$$

Подставляя формулу (1) в (4) получим:

$$V = \frac{q_{изв}}{\tau \cdot C_{изв}}, \qquad (5)$$

$$K_ф = \frac{q_{изв}}{\tau \cdot C_{изв} \cdot \Delta H}. \qquad (6)$$

Выражение (6), полученное коллективом проф. В.М. Москвина, позволяет определить требуемую степень водонепроницаемости как бетонных конструкций подземного сооружения в целом, так и локальных «пятен». Величина $C_{изв}$ в формуле (6) не является постоянной, поэтому ее рекомендуется определять экспериментально, т.к. большое количество допущений и сложность процесса коррозии не позволяют достаточно надежно пользоваться функциональными зависимостями, основанными на использовании общих закономерностей диффузии [3].

Растворимость гидроксида кальция бетона в воде в значительной степени зависит от содержания солей. Ионы Ca^{2+}, OH^- снижают, а ионы SO_4^{2-}, Cl^-, Na^+, K^+ повышают растворимость гидроксида кальция. Повышение растворимости $Ca(OH)_2$ и других составных частей цементного камня усиливает развитие коррозии I вида и ускоряет разрушение бетона.

Из приведенных в табл. 2 данных химических анализов грунтовых вод на дефектных участках Калининского радиуса Московского метрополитена следует, что грунтовые воды содержат значительное количество солей, способствующих быстрому растворению гидроксида кальция бетонных обделок. Этим, по-видимому, и объясняется более высокий уровень течей данных участков (1 течь на 1 мм против 0,06) по сравнению с течами Пролетарской линии метро, где минерализация грунтовых вод гораздо ниже.

Подводя итог изложенному, следует отметить, что решение проблемы обеспечения фильтрационной надежности подземных сооружений требует количественной оценки вероятности образования течей, а, следовательно, и определения допустимого коэффициента фильтрации наиболее неплотных локальных участков бетонной и железобетонной обделок подземных сооружений. Приведенный обзор показывает, что проблема герметизации подземного сооружения не может

Таблица 2

Результаты химических анализов грунтовых вод на дефектных участках

Адрес отбора проб	Катионы, мг/л								pH
	Na^+, K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-	OH^-	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
«Площадь Ильича» – I путь ПК-27 + 59 п.к.р.	36,8	24	29,3	16	76,8	36	122	нет	8,6
«Площадь Ильича» – I путь ПК-40 + 00 п.к.р.	161	168	53,7	140	321,6	нет	6,9	12,8	9,2
«Марксистская» – «Площадь Ильича» ПК-42 + 46 к.р.	105	136	97,6	144	355,2	-	488	нет	6,9
«Площадь Ильича» – «Авиамоторная» – II путь ПК 46+38 п.к.р.	170,2	144	48,8	148	331,2	-	463,6	нет	6,9
«Площадь Ильича» – «Авиамоторная» – II путь ПК 60+92 п.к.р.	9,2	40	58,9	16	115,2	-	268,4	нет	7,5
«Площадь Ильича» – «Авиамоторная» – I путь ПК 61+02 п.к.р.	9,2	20	36,6	12	4,8	нет	244	нет	7,5
«Площадь Ильича» – «Авиамоторная» – I путь ПК 64+48 п.к.р.	9,3	20	36,6	12	4,8	нет	244	нет	7,5
«Авиамоторная» – «Шоссе энтузиастов» – II путь ПК 86+63 п.к.р.	262,2	480	82,4	80	нет	1920	нет	571,2	8,6
«Шоссе энтузиастов» – «Перово» – I путь ПК105+ 11 п.к.р.	184	10	нет	5	161,3	нет	30,5	нет	7,5

Калининского радиуса Московского метрополитена

Жесткость общая	Карбонатная агрессия, мг/л	Углекислотная агрессия, мг/л	Щелочность, мг/л	Содержание Fe, мг/л	Общее содержание солей, мг/л	Вид обделки	Характер течи	Агрессивность
11	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**
3,6	нет	нет	нет	216	-	чугунная	-	агрессивная среда
18,6	9,2	нет	1124	561,2	-	унифицированная	течь из-за обделки	агрессивная среда
14,8	8	37,3	8	нет	10	чугунная	течь из-за обделки	агрессивная по SO_4 среда
11,2	7,6	18,6	7,6	нет	1074	чугунная	течь из-за обделки	агрессивная по SO_4 среда
6,8	4,4	9,3	4,4	нет	373	чугунная	течь из-за обделки	не агрессивная среда
4	4	4,4	4	нет	204	чугунная	течь из-за обделки	не агрессивная среда
4	4	4,4	4	нет	204	чугунная	течи со следами плесени	не агрессивная среда
30,8	30,8	нет	40	нет	1667	унифицированная железобетонная	-	не агрессивная среда
0,5	0,5	6,6	5	нет	512	чугунная	-	не агрессивная среда

Адрес отбора проб	Катионы, мг/л								pH
	Na^+, K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}	CO_3^{2-}	HCO_3^-	OH^-	
«Шоссе энтузиастов» – «Перово» – I путь ПК 11+32 п.к.р.	409	80	12,2	180	892,7	нет	нет	68	8,7
«Шоссе энтузиастов» – «Перово» – I путь ПК 112+25 п.к.р.	44,2	180	73,2	140	499,9	нет	152,5	нет	6,7
«Перово» – «Новогиреево» – I путь ПК 131+18 п.к.р.	349,6	128	24,4	88	513	нет	634	нет	6
«Перово» – «Новогиреево» – II путь ПК 130+94 п.к.р.	145,8	168	82,9	1723	99	нет	512	нет	7
«Перово» – «Новогиреево» – II путь ПК 1330+45 п.к.р.	49,2	40	48,8	56	46,6	36	268,4	нет	7,5
«Тушинская» – I путь	165,5	246	нет	92	163,2	24	нет	224,4	8,7

быть решена лишь за счет улучшения бетонной обделки и ставит вопрос о необходимости мероприятий по управлению характеристиками состояния грунтового массива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ахвердов И.Н.* Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981, 163 с.
2. *Чеховский Ю.В.* Понижение проницаемости бетона. – М.: Энергия, 1968, 190 с.
3. *Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузеев А.А.* Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. – М.: Стройиздат, 1980.
4. *Экспериментальное* исследование водонепроницаемости бетона марки 600-800 при высоких давлениях. //Труды НИИЖБ, М.,1975, вып. №19.
5. *Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И.* Структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979.
6. *Назаренко Ю.Б.* Исследование несущей способности конструкций и долговечности материалов обделки напорных коллекторных тоннелей. – Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МГИ, 1978.
7. *Насберг В.М.* Фильтрационный расчет шпурового дренажа, служащего для разгрузки облицовки тоннелей и шахт от давления грунтовых вод. //Труды ТНИСГЭИ. Вып. 3. – Тбилиси, 1972.
8. *Москвин В.М.* Коррозия бетона. – М.: Недра, 1962.
9. *Кинд В.В.* Коррозия цементов и бетона в гидротехнических сооружениях. – М.: Мысль, 1955.
10. *Юнг В.Н.* Основы технологии вяжущих веществ. – М.: Недра, 1951. ГИАБ

Продолжение табл. 2

Жесткость общая	Карбонатная агрессия, мг/л	Углекислотная агрессия, мг/л	Щелочность, мг/л	Содержание Fe, мг/л	Общее содержание солей, мг/л	Вид обделки	Характер течи	Агрессивность
10	-	нет	4	нет	1442	чугунная	течь сметанообразной массы	агрессивная по SO_4 среда
15	2,5	33	2,5	12,5	1013	чугунная	течь со следами ржавчины	агрессивная по SO_4 среда
8,4	8,4	52,8	10,4	нет	1420	сборная железобетонная прямоугольного очертания	-	агрессивная по сульфатам
15,2	8,4	17,6	8,4	нет	1224	сборная железобетонная прямоугольного очертания	-	агрессивная по сульфатам
6	5,6	нет	5,6	нет	410	сборная железобетонная прямоугольного очертания	течи	не агрессивная среда
12,8	14	нет	14	нет	925	железобетонная	-	не агрессивная среда

Коротко об авторах

Куликова Елена Юрьевна – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительство подземных сооружений и шахт», Московский государственный горный университет.