

Ю.Н. Куликов, Е.Ю. Куликова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УРОВНЯ ПРОЧНОСТИ И ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ ВТОРИЧНЫХ БЕТОННЫХ ОБДЕЛОК

Проведена оценка характера снижения физико-механических показателей бетонной обделки подземных сооружений, на которое существенное влияние оказывают не только технологические параметры бетонных смесей, но и способ их укладки в конструкцию. Установлено, что при расчете прочности и водонепроницаемости вторичных бетонных обделок тоннелей следует учитывать параметры бетона по классу прочности и марке водонепроницаемости, скорректированные по показателям наиболее ослабленной части обделки – сводовой части.

Ключевые слова: прочность, водонепроницаемость, долговечность, укладка бетонной смеси, вторичная бетонная обделка, сейсмоакустическое обследование.

Точечный характер сведений о физико-механических параметрах вторичных обделок коллекторных тоннелей и других выработок, закрепленных бетоном, не дает полного представления о расположении ослабленных и разуплотненных зон и, следовательно, не позволяет спрогнозировать кинетику отказов, межремонтные периоды, долговечность и надежность бетонных обделок подземных сооружений.

Площадное освидетельствование физико-механических свойств несущих конструкций подземных сооружений

дает более широкое представление о наличии возможных ослабленных зон обделки, но практически не решает вопроса конфигурации этих участков и площади их распространения.

Построение изолиний на базе площадного освидетельствования позволяет решить указанную задачу.

Расположение датчиков при сейсмоакустическом обследовании вторичных обделок показано на рис. 1. Датчики располагались на уровне сводовой части, по бокам и лотковой части, причем на каждом уровне они располагались по одной линии вдоль оси выработки на равных расстояниях – 1 м друг от друга.

В каждом тоннеле был выбран участок длиной 15 м с четкой фиксацией расположения технологических швов между заходками бетонирования. Нулевая линия, разграничивающая левую и правую стороны выработки, приняты по центральной оси лотка тоннеля. Расположение датчиков по внутренней окружности вторичной обделки обеспечивалось на равном расстоянии. Таким образом, каждый исследуемый участок имеет равномерно распределенную сетку базовых точек, которая позволяет методами, принятыми в картографии, построить изолинии равных

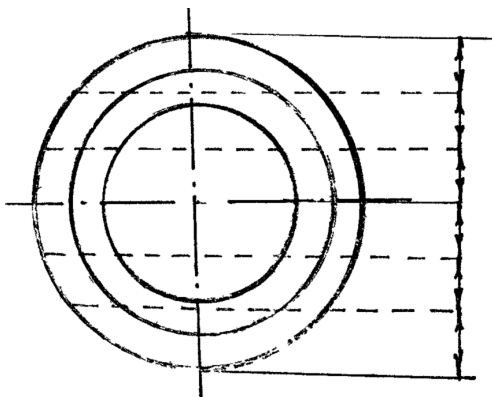


Рис. 1. Схема расположения датчиков при сейсмоакустическом обследовании

Таблица 1

№ п/п	Наименование коллекторного тоннеля	Диаметр тоннеля в свету, м	Толщина вторичной обделки, м	Класс бетона	Возраст бетона, сут	Длина заходки, м	Тип опалубки	Способ укладки бетонной смеси за опалубку	Состав бетона по табл. 3
1.	Канализационный коллектор Курьяновской станции аэрации	4,0	0,2	В 40	31	5	металлическая передвижная	бетононасосом «Шеттер»	1
2.	Канализационный тоннель в районе «Фили» – «Шелепиха»	3,6	0,2	В 40	28	5	металлическая передвижная	бетононасосом «Шеттер»	1
3.	Теплосеть на Волочаевской улице	3,6	0,2	В 55	30	4	деревянная	ручная	2
4.	Канализационный тоннель в районе «Фили» – «Шелепиха»	2,56	0,2	В 55	28	5	деревянная	ручная	2
5.	Канализационный тоннель на Бутырском хуторе	2,00	0,2	В 55	34	3,5	деревянная	ручная	2

Таблица 2

Тоннели по табл.1	Класс бетона	Элемент крепи	Средняя прочность в % от R_{28} , МПа				Средний коэффициент фильтрации, раз от $K_{\Phi} = 1 \cdot 10^{-8}$ см/с																				
			0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6													
№ 1, 2	В 40	«целик»	97	90	84	85	79	81	80	78	77	73	73	73	73	1	1,1	1,2	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,9	1,9	2	2
			97	90	84	84	82	81	77	71	77	76	69	71	1	1,1	1,3	1,5	1,7	1,8	1,9	1,9	2,2	2,1	2	3	3
№ 3, 4, 5	В 55	«целик»	96	85	80	74	67	66	62	59	65	56	-	-	1,3	1,5	1,7	2	2,1	2,2	2,4	3,1	3,2	3,4	-	-	-
			89	76	65	63	68	67	67	67	60	59	-	-	1,3	1,4	2,4	3,3	2,9	3,1	3,7	3,5	3,2	3,6	-	-	-

прочностей и фильтрационных показателей.

Для исследования прочностных и фильтрационных параметров монолитных бетонных обделок были отобраны результаты обследования 5 коммунальных тоннелей. Испытания прочности и водонепроницаемости бетона проводилось при помощи сейсмоакустической станции СН-1 Алма-Атинского производства.

Для определения влияния диаметра тоннелей на прочностные и фильтрационные характеристики его несущих конструкций были обработаны результаты площадного сейсмоакустического обследования обделок тоннелей с внутренним диаметром 2 м, 2,56, 3,6 и 4 м (табл. 1, 2) [1].

Известно, что свойства бетона меняются во времени. С целью обеспечения сопоставимости результатов обследования сейсмоакустические замеры производились на 28–34 день твердения бетона в обделках.

Несмотря на широкое применение металлических передвижных или скользящих опалубок в протяженных выработках одного сечения и укладку бетонных смесей механизированным способом с помощью современных бетононасосов типа «Штеттер», «Пулмейстер» и т.п., достаточно широкое применение (особенно в местах сопряжения выработок переменных сечений) находит ручная укладка бетонных смесей в индивидуальную опалубку. Как правило, подобные части подземных сооружений являются наиболее уязвимыми со стороны агрессивных агентов

и нередко определяют основное количество отказов несущих конструкций подземных сооружений и выход их из строя. Поэтому в настоящем исследовании использованы данные о прочности и водонепроницаемости вторичных обделок, возведенных как механизированным способом, так и вручную. Подобный прием позволяем также расширить представительность исходного материала и практическую ценность полученных решений.

Сопоставление исходного материала обеспечивается еще и тем, что для выбранных подземных сооружений использовался бетон одного и того же завода (2-го завода ОАО «Мосинжстрой»), но двух различных классов: В 40 и В 55. Состав бетонов данных классов приводится в табл. 3.

Использовался цемент Белгородского завода М 400 с $K_{нг} = 0,23$, гранитный щебень фракции 5–20 мм с водопотребностью 1,1, песок фракций 0,25–2,5 мм Калининского карьера Московской области с водопотребностью 3,5.

Всего при решении задач использовано более 900 показателей прочности и водонепроницаемости бетона вторичных обделок с общей площадью 1000 м².

Определение положения изолиний позволило построить график изменения прочностных и фильтрационных показателей обделок подземных сооружений и выявить их зависимость от диаметра тоннелей (высоты полуразвертки), класса бетона обделки, участка поперечного сечения (посередине

Таблица 3

Класс бетона	Состав бетона, кг				
	цемент (Ц)	песок (П)	щебень (Щ)	вода (В)	водоцементное отношение (В/Ц)
В 40	410	567	1259	160	0,44
В 55	480	530	1270	170	0,35

заходки или в зоне технологического шва) и др.

Полученные данные по сечению тоннеля представляют собой статистическую совокупность, которая позволяет найти закономерность изменения характеристик вторичной обделки. Обработка данных производилась апробированными методами прикладной математической статистики [1], [3], [4], [5].

Механизм образования неоднородности свойств вторичных обделок позволяет установить количественную зависимость между искомым параметром и высотой полуразвертки вторичной обделки. Графическая обработка результатов топографического обследования вторичных бетонных обделок приведена на рис. 2 – для прочностных параметров и на рис. 3 – для показателей водонепроницаемости.

Графический анализ зависимости прочности и водонепроницаемости вторичных обделок от высоты развертки позволил выявить существенную разницу между показателями для тоннелей, где обделка возводилась механизированным способом (металлическая передвижная опалубка, бетононасос «Штеттер») и тоннелей, где обделка возводилась вручную. Несмотря на то, что полученные зависимости для обоих случаев имеют тот же характер, степень падения показателей значительно выше для обделок, сооружаемых вручную.

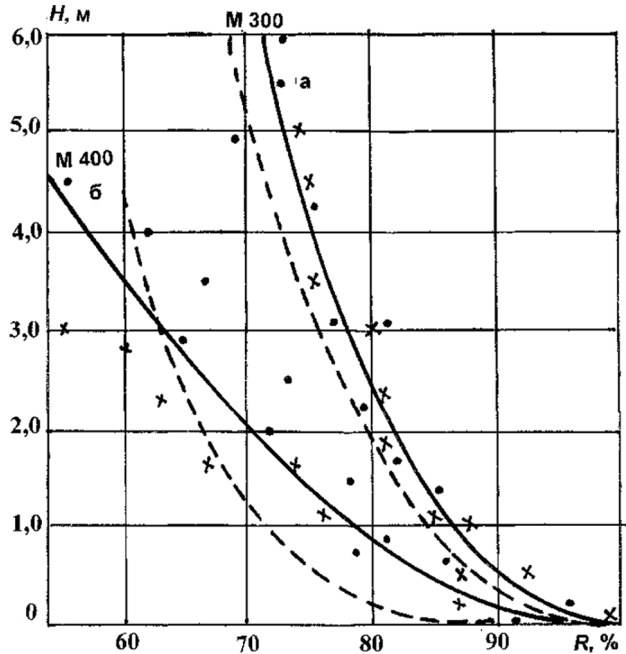


Рис. 2. Зависимость прочности бетона обделок от диаметра тоннеля

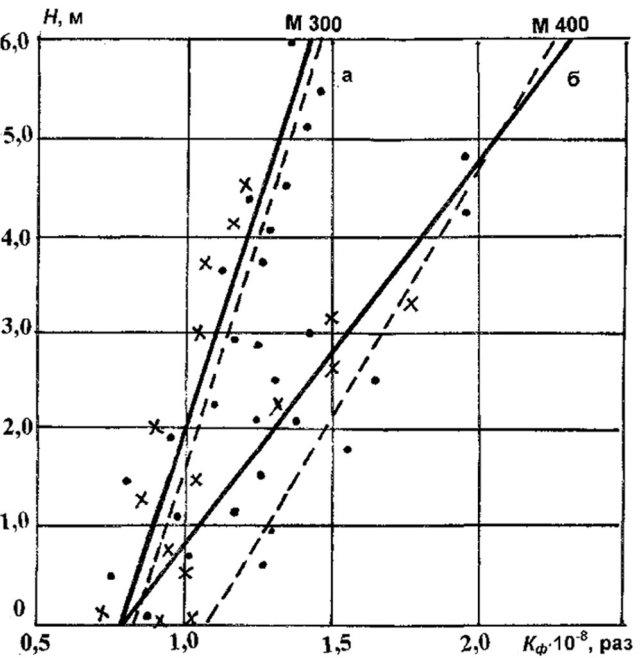


Рис. 3. Зависимость водонепроницаемости бетона обделок от диаметра тоннеля

Характер зависимостей для прочности и водонепроницаемости различен: для прочности характерна параболическая зависимость, для водонепроницаемости – линейная.

Сплошной линией обозначены зависимости прочности и коэффициента фильтрации бетонных вторичных обделок от высоты развертки в «целиковой» части (посередине заходки), пунктирной – по технологическому шву.

Различие в зависимостях для тоннелей, построенных с механизированным возведением обделки и с обделкой, возведенной вручную, можно было бы объяснить влиянием класса бетона, однако следует обратить внимание на то, что несмотря на применение при механизированной укладке бетонной смеси бетона более низкого класса (В 40), чем при ручной (В 55), абсолютные показатели и степень их падения по высоте

для первого случая менее критичные, хотя логичнее было бы предположить обратное, если рассматривать вопрос с позиций влияния класса бетона.

Показатели прочности и водонепроницаемости технологических швов при механизированной укладке значительно отличаются от соответствующих показателей «целика» заходки бетонирования. При ручной укладке в нижней части тоннеля показатели для швов отличаются друг от друга более существенно. Вероятно, это связано со скоростью укладки бетонных смесей.

Определение параметров эмпирических зависимостей прочности и водонепроницаемости вторичных обделок от высоты полуразвертки внутренней поверхности тоннелей производилось методами математической статистики [2], [3], [4]. Предварительно были собраны данные по средним вертикальным

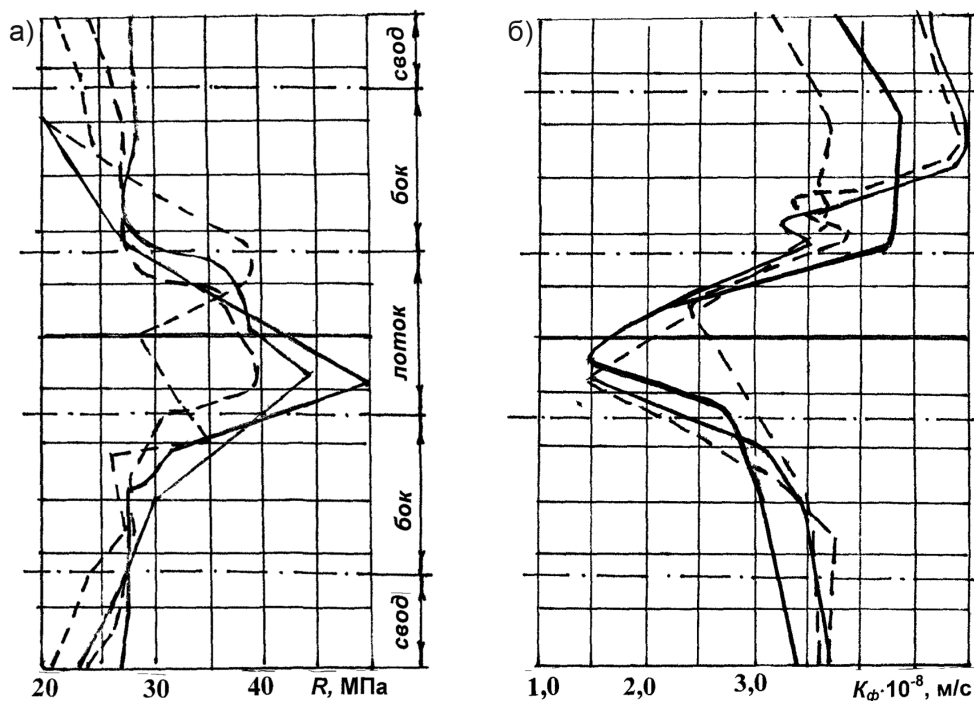


Рис. 4. Изменение прочности (а) и водонепроницаемости (б) для тоннеля № 5 ($D = 2,0$ м, бетон класса В 55, ручная укладка, $L = 3,5$ м, $T = 340$ дней): пунктирной линией указаны зоны швов, сплошной – середина заходки

линиям заходок и по линиям технологических швов. Усредненные данные о прочности и водонепроницаемости по указанным линиям приводятся в табл. 2.

Потери прочности определялись в от R28 примененного для возведения вторичной отделки бетона, увеличение коэффициента фильтрации в единицах по сравнению с исходной величиной водонепроницаемости (в данном случае с $K_{\text{ф}} = 1 \cdot 10^{-8}$ см/с).

В результате проведенных расчетов установлено, что падение прочности бетона по высоте тоннеля в для «целика» бетонной вторичной отделки, возводимой механизированным способом, подчиняется следующей закономерности:

$$R\% = \frac{1}{0,00052H + 0,0108}, \quad (1)$$

где H – высота развертки, м, $H = \frac{\pi D}{2}$;

D – внутренний диаметр тоннеля, м.

Прочность бетона в швах в этом случае определяется аналогичной формулой:

$$R\% = \frac{1}{0,00064H + 0,0105}. \quad (2)$$

Изменение водонепроницаемости бетона вторичных отделок, возведенных механизированным способом, в «целике» описывается уравнением:

$$K = 0,213H + 0,901, \text{ раз}, \quad (3)$$

в шве данная зависимость приобретает вид:

$$K = 0,23H + 1,013, \text{ раз}. \quad (4)$$

Для вторичных отделок, возведенных вручную (кривые б на рис. 4), падение прочности по высоте коллектора описывается уравнениями:

$$R\% = \frac{1}{0,00145H + 0,0105}, \quad (5)$$

для шва та же зависимость приобретает вид:

$$R\% = \frac{1}{0,008H + 0,0129}. \quad (6)$$

Изменение водонепроницаемости отделок, возведенных вручную, подчиняется уравнениям:

• для «целика»:

$$K = 0,46H + 1,03, \text{ раз}, \quad (7)$$

• для шва:

$$K = 0,46H + 1,57, \text{ раз}. \quad (8)$$

Таким образом, получены зависимости, позволяющие прогнозировать уровень изменения прочности и водонепроницаемости бетонных вторичных отделок коллекторных тоннелей как в середине заходок бетонирования, так и в «зонах шва».

Следует иметь в виду, что при механизированной укладке, как правило, применяются пластичные бетонные смеси с показателем подвижности $\Pi_{\text{см}} = 12-14$ см, а при ручной укладке – пластичные бетонные смеси с $\Pi_{\text{см}} = 7-8$ см.

С учетом этого факта выведенные формулы пригодны для расчета изменения прочности бетона вторичных отделок по высоте практически во всех производственных случаях.

Таким образом можно сделать следующие выводы.

На характер снижения физико-механических показателей бетонной отделки подземных сооружений существенное влияние оказывает не только технологические параметры бетонных смесей, но и способ их укладки в конструкцию. При механизированной укладке бетонных смесей показатели физико-механических свойств в своде в меньшей степени отличаются от подобных же показателей в боках и лотке выработки, а их абсолютные значения при механизированной укладке в

1,5–2 раза ниже аналогичных показателей при ручной укладке.

Полученные в результате обработки полученных данных методами математической статистики формулы прочности и водонепроницаемости бетона

вторичных обделок имеют высокий коэффициент корреляции (0,7–0,8) и могут быть использованы при проектировании вторичных бетонных обделок городских коллекторных тоннелей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов Ю.Н. Проектирование подвижности бетонных смесей в подземном строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1997. – выпуск № 2.

2. Куликов Ю.Н. Бетон для подземного и гидротехнического строительства. Авторское свид. № 176196 «Изобретения и товарные знаки» Бюллетень № 21, 1965.

3. Леонтьев Н.Л. Техника статистических вычислений. – М.: Госбумиздат, 1961. – 232 с.

4. Лукомский Я.И. Теория корреляции и ее применение к анализу производства. – М.: Госстандарт, 1965.

5. Успенский А.К. Выбор вида и нахождение параметров эмпирической формулы. – М.: МГЭИ, 1960. **ГИАС**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Куликов Юрий Николаевич – кандидат технических наук, профессор,
Куликова Елена Юрьевна – доктор технических наук, профессор,
МГИ НИТУ «МИСиС», e-mail: ud@msmu.ru.

UDC 624.191

THE DETERMINATION OF THE LEVEL OF STRENGTH AND WATER RESISTANCE SECONDARY CONCRETE LINING

Kulickov Yu.N.¹, Candidate of Technical Sciences, Professor,

Kulickova E. Yu.¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: ud@msmu.ru.

The article estimates the reduction of physico-mechanical characteristics of the concrete lining of underground structures, on which exert significant influence not only the technological parameters of concrete mixture, but the way they are laid in the early construction. It is established, that at calculation of strength and water resistance secondary concrete lining of tunnels one should take into account the parameters of concrete strength and water resistance class adjusted by indices of weakest part of the lining – roof part.

Key words: durability, water resistance, durability, laying concrete mixture, secondary concrete lining, seismoacoustics examination.

REFERENCES

1. Kulikov Yu.N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 1997, no 2.

2. Kulikov Yu.N. *Beton dlya podzemnogo i gidrotekhnicheskogo stroitel'stva. Avtorskoe svidetel'stvo no 176196* (Concrete for underground construction and hydraulic engineering. Copyright certificate no 176196), 1965.

3. Leont'ev N.L. *Tekhnika statisticheskikh vychisleniy* (Statistical computation technique), Moscow, Gosbuzdat, 1961, 232 p.

4. Lukomskiy Ya.I. *Teoriya korrelyatsii i ee primeneniye k analizu proizvodstva* (Theory of correlation and application to production analysis), Moscow, Gosstandart, 1965.

5. Uspenskiy A.K. *Vybor vida i nakhozhdeniye parametrov empiricheskoy formuly* (Selection of empirical formula and determination of its parameters), Moscow, MGEI, 1960.