

Ю.Н. Куликов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНИХ НАГРУЗОК УПЛОТНЕНИЯ НА БЕТОННУЮ СМЕСЬ ПРИ УКЛАДКЕ ВО ВТОРИЧНУЮ ОБДЕЛКУ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Представлена методика исследования характера формирования физико-механических свойств вторичных обделок подземных сооружений на основе схемы расположения датчиков при их акустическом обследовании. Сделан вывод о влиянии конфигурации поперечного сечения выработки и, в данном случае, вторичной бетонной обделки подземного сооружения на характер передачи нагрузки верхних слоев на нижние.

Ключевые слова: вторичная обделка подземного сооружения, водоцементное отношение, численный эксперимент, водопотребность, обделка, опалубка, укладка бетонной смеси.

В основе процессов формирования физико-механических свойств вторичных обделок подземных сооружений лежит остаточное водоцементное отношение, которое свидетельствует об отжиме части воды затвердения из бетонной смеси под действием внешних прессующих сил. В рассматриваемых конструкциях такими силами могут быть только нагрузки от собственного веса бетонной смеси P , которые фигурируют в математическом описании ключевого в рассматриваемых процессах параметра ε' (формула (1)). Воздействие вибрационного уплотнения на величину ε' в формуле (1) учтено, поэтому использование ее для дальнейших исследований правомерно [1], [2].

$$\varepsilon' = \varepsilon'_n + (\varepsilon'_0 - \varepsilon'_n) \left\{ \frac{1,21}{P} \left[(P_0 + P) \left(\frac{P_0}{P_0 + P} \right)^{0,18} - P_0 \right] \right\}. \quad (1)$$

где ε'_n – коэффициент пористости цементного геля; ε'_0 – коэффициент начальной пористости; P – нормальное давление бетонной смеси; P_0 – внутреннее пороговое давление.

Как известно, прочность и коэффициент фильтрации бетона для каждого данного состава зависит от его B/C , точнее от $(B/C)_{\text{ост}}^6$. Поэтому можно утверждать, что закономерности изменения показателя прочности и коэффициента фильтрации бетонных вторичных обделок подземных сооружений должны быть адекватны изменению $(B/C)_{\text{ост}}^6$.

Определение $(B/C)_{\text{ост}}^6$ в каждой точке конструкции может быть произведено по формулам (1), (2).

$$\left(\frac{B}{C} \right)_{\text{ост}}^6 = X_{\text{ост}} K_{н.г} + \frac{B_3}{C}, \quad (2)$$

$$\text{где } X = \frac{(B/C)_{\text{ост}}^r}{K_{н.г}}, \quad \left(\frac{B}{C} \right)_{\text{ост}}^r = \alpha \cdot \frac{\varepsilon'}{\gamma_u} \cdot (B/C)_{\text{ост}}^r,$$

Таблица 1

Расход материалов, кг/м ³				$(B/L)^6$ начальное	Плотность бетонной смеси, кг/м ³
цемент (Ц)	щебень (Щ)	песок (П)	вода (В)		
370	780	1045	186	0,502	2380

α – коэффициент, характеризующий среднюю плотность воды в цементном геле; $\gamma_{и}$ – кажущаяся плотность цемента; $K_{н.г}$ – коэффициент нормальной густоты цементного геля, B_3 – водопотребность заполнителя, определяется экспериментально.

Поэтому за основу в решении задачи о физико-механических свойствах вторичных бетонных обделок подземных сооружений был принят численный эксперимент. При этом выбраны наиболее доступные для обследования типовые размеры коллекторных тоннелей и характерный состав бетонной смеси, применяемые в практике строительства коллекторных тоннелей в Москве.

В частности, исследование проводилось для коллекторного тоннеля, проходимого щитом диаметром 4 м с типовой блочной железобетонной обделкой и бетонной вторичной обделкой толщиной 0,2 м.

Вторичная бетонная обделка возводилась из бетона, приготовленного на товарном портландцементе М 400 с $K_{н.г} = 0,29$. В качестве заполнителя использовались гранитный щебень и речной песок, суммарная водопотребность которых $B_3 = 31$ л на 1 м³ бетона. Состав бетонной смеси приводится в табл. 1.

Определение величины остаточного (после отжима лишней воды) $(B/L)^6_{ост}$ производилось для точек поперечного контура тоннеля, расположенных в его лотке, боках, своде и в соответствии со схемой рис. 1 [3].

Эта схема соответствует схеме расположения датчиков при акустическом обследовании физико-механических свойств вторичных обделок тоннелей. Такое расположение точек принято из соображений сопоставимости результатов численного эксперимента с натурными данными. Последние являются критерием достоверности проведенных исследований.

Гравитационные силы, создающие нагрузку в исследуемых точках, сосредоточены по направлению вертикального диаметра выработки. При этом выработка имеет две симметричные части относительно вертикального диаметра. Благодаря симметрии результаты определения $(B/L)^6_{ост}$ в левой части идентичны значениям тех же показателей в правой. Поэтому в исследовании рассмотрены показатели $(B/L)^6_{ост}$ только для правой части поперечного сечения подземного сооружения.

В свете выше изложенного, дальнейшие исследования имеют следующую последовательность и содержание:

- определяется нагрузка P , приложенная к каждой точке на схеме рис. 1;

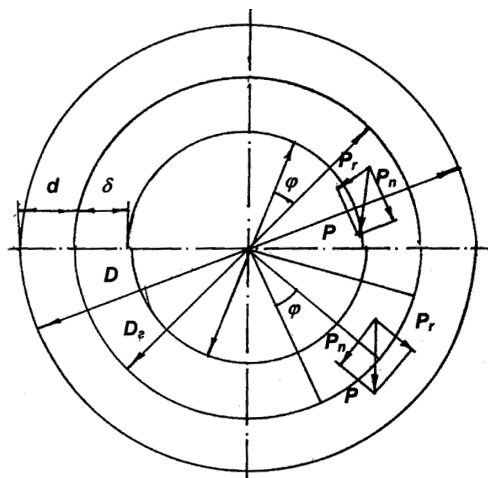


Рис. 1. Схема расположения исследуемых точек при определении $(B/L)^6_{ост}$ бетона вторичных обделок

- определяются значения показателей, входящих в формулу (1);
- рассчитываются значения $(B/L)_{\text{ост}}^6$ для каждой точки приложения сил на схеме рис. 1;
- обрабатываются полученные результаты эксперимента и делаются соответствующие выводы.

• При определении внешней нагрузки P на уложенную в опалубку бетонную смесь рассматриваются два варианта:

• I вариант – нагрузка передается только со стороны данного блока уложенной бетонной смеси на компоненты последней. В этом случае с известным приближением моделируются процессы ручной укладки бетонной смеси, характерной для ряда обследованных тоннелей. Предполагается, что в связи с медленным течением процессов укладки бетонная смесь в нижних слоях успевает схватиться и за счет этого приобретает определенную прочность, которая препятствует отжиму части воды в вышерасположенные слои укладки (блоки);

• II вариант – нагрузка рассматривается как суммарная от вышележащих слоев (блоков) на данный слой (блок). Такая схема соответствует механизированной укладке бетона во вторичную обделку подземных сооружений.

В соответствии со схемой рис. 1. обделка разбивается на 16 равносторонних блоков, каждый из которых имеет вес, равный

$$SL\gamma_{\text{бс}} = Q, \text{ кг/м}^3, \quad (3)$$

где L – длина блока, м; $\gamma_{\text{бс}}$ – плотность бетонной смеси, кг/м³; S – площадь блока в плоскости, перпендикулярной оси тоннеля или площадь кольцевого сектора, м²;

$$S = \frac{\varphi\pi}{360}(R^2 - r^2), \quad (4)$$

где $R = D/2$ – наружный радиус блока, м; D – диаметр кольца, м; φ – центральный угол радиусов, ограничивающих кольцевой блок, град.; r – внутренний радиус блока, м.

Вес каждого блока действует на уложенную в блок бетонную смесь на площади F :

$$F = \delta L = (R - r)L, \text{ м}^2. \quad (5)$$

Сила, действующая на площадь F уложенной в конструкцию бетонной смеси будет равна [3]:

$$PF = Q_1. \quad (6)$$

Приравнивая силовые показатели уравнений (3) и (6) и подставляя в это уравнение выражения (4) для S и (5) для F найдем:

$$P = \frac{\varphi\pi(R+r)\gamma_{\text{бс}}}{360}. \quad (7)$$

При анализе схемы на рис. 1 и полученной формулы (7) можно сделать вывод о влиянии конфигурации поперечного сечения выработки и, в данном случае, вторичной бетонной обделки подземного сооружения на характер передачи нагрузки верхних слоев на нижние. Для этого с определенной долей приближения вертикальную силу P разложим на действующую по геометрической оси вторичной обделки.

Очевидно, что нормальная нагрузка P_n является определяющей при отжиме излишней воды затворения из уложенной в опалубку круговой вторичной обделки тоннеля. В то же время радиальная нагрузка P_r будет иметь разное направление вектора в первой и второй четвертях поперечного сечения выработки.

Это значит, что отжим излишней воды затворения из уложенной в опалубку смеси в своде будет направлен к опалубке, что неизбежно приведет к повышению $(B/L)^6_{ост}$ во внешнем, прилегающем к опалубке слое бетона. В лотке и прилегающей к нему части бока тоннеля отжим излишней воды затворения будет направлен в сторону сборной обделки. Если обделка имеет хорошо зачеканенные швы между железобетонными блоками, такой отжим вызовет лишь повышение $(B/L)^6_{ост}$ во внутреннем (прилегающем к породе) слое бетонной вторичной обделки. Если чеканка швов отсутствует, излишняя вода отфильтровывается во вмещающие подземное сооружение породы, что снизит $(B/L)^6_{ост}$ и приведет к повышению прочности и водонепроницаемости нижней части вторичной бетонной обделки подземного сооружения.

Конфигурация поперечного сечения тоннеля оказывает влияние не только на направление вектора отжима излишней воды затворения укладываемой бетонной смеси, но и изменяет приложение нормальных P_n и радиальных P_r сил, уплотняющих бетонную смесь. Изменение $(B/L)^6_{ост}$ в этом случае происходит по высоте (вертикальному диаметру) выработки.

Численные значения P_n и P_r и характер этого изменения для исследуемых точек сечения вторичной обделки могут быть определены на основании схемы на рис. 2.

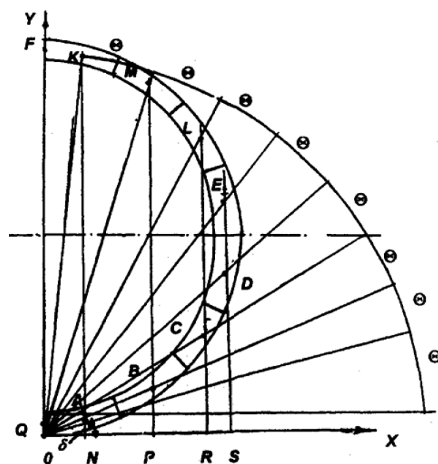


Рис. 2. Расчетная схема при определении нагрузок вышележащих слоев бетонной смеси на нижележащие

Таблица 2

Точки на контуре	0	A	B	C	D	T	L	M	K	F
Угол наклона, град	0	11,25	22,5	33,75	45,0	56,25	67,5	78,75	90,0	-
При прерывной укладке бетонной смеси										
Нормальная уплотняющая сила P_n , МПа	0,036	0,035	0,053	0,030	0,025	0,019	0,014	0,07	0,0	-
Радиальная уплотняющая сила P_r , МПа	0,0	0,007	0,014	0,019	0,025	0,030	0,033	0,035	0,036	-
При непрерывной укладке бетонной смеси										
Нормальная уплотняющая сила P_n , МПа	0,165	0,162	0,127	0,094	0,065	0,040	0,021	0,007	0,007	-
Радиальная уплотняющая сила P_r , МПа	0,033	0,032	0,053	0,063	0,066	0,061	0,050	0,036	0	-

В соответствии со схемой можно предположить, что отжатая вода переходит из «блока» в «блок» по кривой *ABCDELMKF*. Учитывая, что весовая характеристика *P* «блока», рассчитанная по формуле (7) постоянна, переменной величиной при анализе нагрузок на свежееуложенную бетонную смесь является величина угла Θ . При равномерном расположении «блоков» по кривой *A–F* положение каждой из рассматриваемых точек будет отличаться на $90^\circ/8 = 11,25^\circ$. Тогда каждая из точек будет находиться под углом Θ к горизонтали (оси *x*), указанном в табл. 2.

Применительно к составу бетона, приведенному в табл. 2, величина *P* определена по формуле (7) и равняется 0,036 МПа. Величины нормального и радиального давления на бетонную смесь, уложенную в опалубку вторичной обделки коммунального тоннеля диаметром в проходке 4 м приводятся в табл. 3. Эти величины получены в соответствии с положением данной точки на осевой кривой вторичной бетонной обделки коммунального тоннеля по формулам, вытекающими из расчетной схемы на рис. 2:

$$P_n = P \cos \Theta; P_r = P \sin \Theta. \quad (8)$$

Данные табл. 2 наглядно демонстрируют значительную изменчивость внешнего давления на бетонную смесь, уложенную в обделку или крепь горной выработки с криволинейными очертаниями. Бесспорно, подобное изменение величин P_n и P_r приводит к существенному изменению величины ϵ' и, как следствие, $(B/L)_{\text{ост}}^6$ каждого яруса по ходу укладки бетонной смеси.

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

- нагрузки на свежееуложенную бетонную смесь нижерасположенных ярусов значительно отличаются от нагрузок верхних ярусов. Это приводит к образованию различной пористости бетонной смеси и, как следствие, к различию величины $(B/L)_{\text{ост}}^6$ этих ярусов;
- круговое очертание контура коммунального тоннеля обуславливает разложение сил давления на уложенную бетонную смесь на нормальные и радиальные. При этом в верхней части отжатая радиальным давлением вода перемещается к опалубке и повышает $(B/L)_{\text{ост}}^6$, тем самым снижается прочность поверхностного слоя обделки;
- в нижней части отжим радиальными силами направлен в сторону вмещающих пород. Если блочная железобетонная обделка имеет хорошо зачеканенные швы между блоками, вода остается на данном ярусе укладки бетонной смеси и снижает прочность и другие физико-механические показатели вторичной бетонной обделки. Если швы не зачеканены, отжатая вода уходит в породу, снижается $(B/L)_{\text{ост}}^6$ на каждом ярусе, увеличивается прочность и улучшаются другие физико-механические параметры вторичной бетонной обделки подземного сооружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахвердов И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 163 с.
2. Ахвердов И.Н. Прочность и деформативность бетона в водонасыщенном состоянии // Труды координационных совещаний по гидротехнике. – М.: Энергия, 1971.
3. Куликов Ю.Н. Проектирование подвижности бетонных смесей в подземном строительстве // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1997. – выпуск № 2. **ГИАВ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

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

DEFINITION OF EXTERNAL LOADS SEAL ON CONCRETE MIX WHEN LAYING INTO SECONDARY LINING OF UNDERGROUND CONSTRUCTIONS

Kulickov Yu.N., Candidate of Technical Sciences, Professor,
Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia, e-mail: ud@msmu.ru.

The article presents the methodology of the study of the character of formation of physical-mechanical properties of secondary lining of underground structures on the basis of the lay-outs of sensors with their acoustic survey. The conclusion: there is the influence of the configuration of the cross-section of secondary concrete lining of underground constructions on the character transfer the load of the upper layers on the bottom.

Key words: secondary lining of underground works, water-cement ratio, numerical experiment, water, lining, casing, the laying of concrete mixture.

REFERENCES

1. Akhverdov I.N. *Osnovy fiziki betona* (Basic physics of concrete), Moscow, Stroyizdat, 1981, 163 p.
2. Akhverdov I.N. *Trudy koordinatsionnykh soveshchaniy po gidrotekhnike* (Proceedings of coordination meetings on hydraulic engineering), Moscow, Energiya, 1971.
3. Kulikov Yu.N. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 1997, no 2.



ОТДЕЛЬНЫЕ СТАТЬИ ГОРНОГО ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО БЮЛЛЕТЕНЯ (СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК)

ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОГО КОМПЛЕКСА В XXI ВЕКЕ

Лиготский Д.Н., Холодныяков Г.А., Абдуллаев М.Д. и др.

В сборник вошли статьи по проблемам обеспечения комплексной безопасности на предприятиях минерально-сырьевого комплекса, в частности работы, посвященные проветриванию шахт, рудников и подземных сооружений, обеспечению безопасности горных выработок по метановому, пылевому и радоновому факторам, мониторингу геодинамических и сейсмических процессов, совершенствованию системы управления и охраной труда, в том числе вопросам подготовки и повышения квалификации кадров, обеспечению промышленной и экологической безопасности предприятий металлургической и нефтегазовой отраслей. Выпуск научных трудов подготовлен по материалам II международной научно-практической конференции «Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке». Для специалистов в области охраны труда и промышленной безопасности горнодобывающей, металлургической и нефтегазовой отраслей.

Ключевые слова: минерально-сырьевой комплекс, обеспечение комплексной безопасности, проветривание шахт, рудников, метан, пылевой фактор, геодинамические и сейсмические процессы, промышленная и экологическая безопасность.

INDUSTRIAL SAFETY MINERAL COMPLEX IN THE XXI CENTURY

Ligotskiy D.N., Kholodnyakov G.A., Abdullaev M.D. and others.

The collection includes articles on problems of complex safety at the enterprises of the mineral resources sector, in particular work on the ventilation of mines, mines and underground structures, safety mining methane, dust and radon fact-RAM, monitoring of geodynamic and seismic processes, the improvement of the management system and occupational health & safety, including training and skills development, providing industrial and ecological safety of the enterprises of metallurgical and oil and gas industries. The production of scientific papers based on the materials of II international scientific-practical conference «Industrial safety enterprises of the mineral complex in the XXI century». For specialists in the field of labor protection and industrial safety in mining, metallurgical and oil and gas industries.

Key words: the mineral complex, providing integrated security, ventilation of mines, mines, methane, dust factor, geodynamic and seismic processes, industrial and environmental safety.