

УДК 69.035.4

А.Н. Левченко

ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ БЛОЧНОЙ ОБДЕЛКИ КОЛЛЕКТОРНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Практика эксплуатации коллекторных тоннелей показывает, что проектируемые и производимые в России блочные обделки обладают большой металлоёмкостью арматурного каркаса, совершенно излишней для обеспечения их несущей способности.

Причину следует искать в действующих нормах проектирования, регламентирующих завышенные нагрузки от горного давления и расчётные схемы, неадекватно отражающие геомеханическую ситуацию нагружения и деформирования блочной обделки в породном массиве.

Согласно действующих нормативов блочные обделки, возводимые по технологии щитовой проходке при подземном способе производства горностроительных работ, воспринимают нагрузку от горного давления, которая определяется весом полного столба породы до земной поверхности. Если проанализировать существующие технологии производства горных работ по проходке коллекторных тоннелей, такая геомеханическая ситуация возможна только в двух случаях: проходка осуществляется в обводнённых грунтах (типа пльвунов) или открытым способом, т.е. конструкция обделки укладывается на дно котлована и затем засыпается. Первый случай встречается крайне редко и требует специальных технологий проходки, а второй случай представляется нереальным, поскольку блочная обделка не может воспринимать нагрузку в условиях сво-

бодного деформирования на дне котлована. Таким образом, нагрузка на блочную обделку от веса полного столба породы до земной поверхности может реализоваться только в исключительных геологических условиях.

Проанализируем геомеханическую природу формирования нагрузки от горного давления при подземном способе производства горностороительных работ. При этом будем исходить из основного положения механики подземного сооружения [1]: нагрузка от горного давления и возникающие в обделке внутренние усилия, а следовательно и металлоёмкость арматурного каркаса, определяются смещениями окружающего породного массива и жесткостью самой конструкции обделки.

Возникающие в породном массиве смещения можно подразделить на начальные и дополнительные. И те и другие смещения определяются собственным весом горных пород, но природа механизма их возникновения разная. Начальные смещения возникают при формировании породного массива: формирование породного массива и его уплотнение за длительный геологический период или образование насыпного грунтового массива и его усадка при открытом способе производства горностроительных работ. Дополнительные смещения возникают при образовании выработанного пространства и представляют смещения в сторону выработанного пространства. По традиционной

расчётной схеме, которая заложена в действующие нормативные документы и представляет расчётный фрагмент породного массива с горной выработкой и удаленными от неё границами, где приложены начальные напряжения в массиве на глубине заложения выработки, определяются суммарные смещения на контуре выработки (начальные и дополнительные). Поскольку природные начальные смещения давно реализовались за длительный геомеханический период до сооружения выработки, нагрузка на обделку от горного давления будет определяться не суммарными, а только дополнительными смещениями окружающего породного массива. Последние при использовании традиционной расчётной схемы представляют разность суммарных и начальных смещений, что значительно осложняет последующие расчёты. Если смещения на контуре выработки сопровождаются разрушением горных пород, определение дополнительных смещений как алгебраической разности суммарных и начальных смещений является неправильным с математической точки зрения. В этом смысле использование традиционной расчётной схемы для определения смещений на контуре выработки некорректным.

Традиционная расчётная схема может быть использована при открытом способе производства горностроительных работ, когда начальные смещения усадки грунтового массива и дополнительные смещения от образования выработки происходят практически одновременно, но как отмечается выше, открытый способ горностроительных работ несовместим с конструктивными особенностями блочной обделки. По указанным причинам использование традиционной расчётной схемы для определения смещений контура выработки представляется ошибочным при оценки

нагрузок на блочную обделку от горного давления.

Рассмотренный механизм смещений на контуре выработки обсуждался ещё 50 лет назад в работах И. В. Родина [2], но последующее развитие геомеханики с использованием механики деформируемого твёрдого тела пошло по направлению применения для подземных горностроительных работ указанной выше традиционной схемы определения смещений. В опубликованной работе В.Г. Хлопцова и И.В. Баклашова [3] подробно анализируется ошибочность применения традиционной расчётной схемы для горных выработок и подземных сооружений, возводимых подземным способом.

В указанной работе предлагается следующая расчётная схема, которая адекватно отражает условия нагружения блочной обделки и может быть использована для её проектирования. Горностроительные работы производятся подземным способом с обжатием блочной обделки в грунтовый массив и нагнетанием за обделку тампонажного раствора, что обеспечивает её плотный контакт с грунтовым массивом. При этом механическое состояние вышележащего грунтового массива, где начальные смещения уплотнения давно произошли при его формировании, не нарушается. Проходка выработки вызывает только разгрузку её контура на величину начальных напряжений в массиве на глубине заложения выработки. В результате этого на контуре выработки возникают дополнительные смещения в сторону выработанного пространства, которые воспринимает блочная обделка, деформируясь в соответствии со своей жёсткостью, что формирует нагрузку на обделку от горного давления. Поскольку величина дополнительных смещений меньше суммарных смещений (допол-

нительных и начальных), величина нагрузки от горного давления будет меньше и соответственно будет меньше металлоёмкость арматурного каркаса блоков.

Предлагаемая расчётная схема представляет расчётный фрагмент массива с горной выработкой и удалёнными от неё границами, которые свободны от напряжений, а на контуре выработки, контактирующем с конструкцией обделки, приложены так называемые по терминологии И.В. Родина [2] «снимаемые» с контура выработки напряжения, численно равные начальным напряжениям в нетронутом грунтовом массиве на глубине заложения продольной выработки за вычетом реактивного сопротивления обделки, которое представляет нагрузку на обделку и находится в условия совместного деформирования грунтового массива и обделки.

Поскольку величина определяемой нагрузки зависит от уровня начальных напряжений в нетронутом грунтовом массиве, следует указать на следующие обстоятельства, которые как правило не учитываются в действующих нормативах по проектированию обделок коллекторных тоннелей, где предлагается определять начальные напряжения как γH , γ -объёмной вес перекрывающих грунтов, H - глубина заложения продольной оси тоннеля от земной поверхности. Такая величина начальных напряжений может наблюдаться только в относительно слабых обводнённых грунтах и на малых глубинах заложения, в то время как в плотных грунтах наблюдается образование «свода давления» и начальные напряжения будут равны $\kappa\gamma H$, где $\kappa \leq 1$ - понижающий коэффициент, учитывающий механизм образования «свода давления» и зависит от размеров выработки, технологии её сооружения, глубины заложения и структурно-

механических свойств перекрывающего грунтового массива.

Кроме того, при определении начальных напряжений в грунтовом массиве следует учитывать нагрузки от транспорта на земной поверхности, которая по действующим нормативам равна $19/(3+H_1)$ [m/m^2], где H_1 - глубина заложения до свода тоннеля. В расчётах с запасом прочности обделки можно положить $H_1 = H$. На величину начальных напряжений в грунтовом массиве оказывает влияние также взвешивающее действие подземных вод, снижая величину начальных напряжений: если уровень грунтовых вод по отношению к продольной оси от выработки составляет $H_B \geq kh$, следует принимать объёмный вес грунтов в воде $(1-n)\gamma$, где n - пористость грунтов, которая изменяется в интервале $0,3 \div 0,4$. В расчётах с запасом прочности обделки следует ориентироваться на ситуацию осушения грунтового массива по природным или технологическим причинам, т.е. следует принимать $n = 0$.

Таким образом, если рассматривать коллекторный тоннель кругового поперечного сечения, что, как правило, соблюдается при подземном способе горностроительных работ, и принимать цилиндрическую систему координат в плоскости поперечного сечения тоннеля, считая полярный угол θ от вертикального диаметра, начальные напряжения в грунтовом массиве можно определить из следующих выражений:

$$\text{радиальные напряжения} \\ \sigma_r = 0,5[(1 + \lambda) + (1 - \lambda)\cos 2\theta]p,$$

$$\text{касательные напряжения} \\ \tau_{r\theta} = -0,5(1 - \lambda)\rho\sin 2\theta, \quad (1)$$

где λ – коэффициент бокового распора в грунтовом массиве, который можно определить через коэффициент Пуассона μ (для грунтовых массивов среднее зна-

Таблица 1

Величина приведённого максимального начального напряжения в грунтовом массиве

H(м)	6	10	15	20	25	30	35	40
$p(\tau/m^2)$	14,65	16,09	19,86	21,73	26,80	31,93	37,10	42,24

чение $\mu = 0,33$), т.е. $\lambda = \mu/(1-\mu)$, откуда получим $\lambda = 0,5$; p - приведённое максимальное начальное напряжение по горизонтальным площадкам в грунтовом массиве на глубине заложения H продольной оси тоннеля, которые с учётом сделанных выше допущений в запас прочности обделки будет равно

$$p = \kappa\gamma H + \frac{19}{3 + H}, \quad (2)$$

В табл. 1 представлены вычисленная величина p в зависимости от глубины заложения тоннеля H , где расчетный объёмный вес $\gamma = 2,09 \text{ т/м}^3$ и понижающий коэффициент κ при образовании свода давления принят равным 1 при $H \leq 6 \text{ м}$, 0,7 при $H = 10 \text{ м}$, 0,6 при $H = 15 \text{ м}$ и 0,5 при $H \geq 20 \text{ м}$.

«Снимаемые» с породного контура тоннеля напряжения, которые учитывают реактивные сопротивления обделки или нагрузки на обделку, будут равны.

$$\sigma_r = (0,75p + q_1) + (0,25p + S_1)\cos 2\theta,$$

$$\tau_{r\theta} = -0,25p + t_1\sin 2\theta, \quad (3)$$

где q_1, S_1, t_1 - параметры нагрузки на обделку, которые определяются из условия совместного деформирования грунтового массива и обделки, т.е. из решения контактной задачи.

Параметры нагрузки на обделку зависят от жёсткости самой конструкции обделки. Можно рекомендовать следующую процедуру расчёта, учитывающую конструктивные особенности блочной обделки.

На первом этапе конструктивная податливость обделки в стыках между блоками не учитывается, т.е. кольцо

обделки рассматривается в постановке плоской деформации как бесшарнирная конструкция с независимой от полярного угла θ жёсткостью. По вычисленным из решения контактной задачи параметрам нагрузки q_1, S_1, t_1 определяются окружные нормальные напряжения на внутреннем $\sigma_{\theta B}$ и наружном $\sigma_{\theta H}$ контурах бесшарнирного кольца блочной обделки:

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta B} &= 2 \frac{k_1^2}{k_1^2 - 1} \left[q_1 - 2 \frac{(k^2 + 1)S_1 - t_1}{k_1^2 - 1} \cos 2\theta \right] \\ \sigma_{\theta H} &= \frac{k_1^2 + 1}{k_1^2 - 1} q_1 + \\ &+ \left[\left(1 + 8 \frac{k_1^2}{(k^2 - 1)^2} \right) S_1 + 2t_1 \left(1 - \frac{2}{(k^2 - 1)^2} \right) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

где напряжения растяжения приняты положительными, а напряжения сжатия отрицательными и $K_1 = D_H/D_B$ - геометрический параметр обделки, равный отношению её наружного диаметра D_H внутреннему D_B .

Внутренние усилия (изгибающие моменты M_θ и нормальные силы N_θ в бесшарнирном кольце блочной обделки определяется следующим образом по вычисленным напряжениям на контуре:

$$M_\theta = \frac{\sigma_{\theta B} - \sigma_{\theta H}}{2} W, \quad N_\theta = \frac{\sigma_{\theta B} + \sigma_{\theta H}}{2} F, \quad (5)$$

где $W = bd^2/6$ - момент сопротивления продольного сечения кольца обделки

Таблица 2
**Безразмерные величины внутренних усилий
 в обделке от воздействия собственного веса**

Угловая координата продольных сечений θ , гр	0	30	60	90	120	150	180
$M_\theta / (GR / \pi)$	+0,223	+0,132	-0,082	-0,262	-0,238	+0,130	+0,410
$N_\theta / (G / \pi)$	0,0	0,0	-0,355	-0,785	-0,101	-0,828	-0,610

шириной b и толщиной d ; $F = bd$ - площадь продольного сечения обделки.

Формулы (5) для внутренних усилий учитывают воздействие для горного давления и транспортной нагрузки на земной поверхности. На малых глубинах заложения при большом поперечном сечении обделки может оказать существенное влияние на величину внутренних усилий собственный вес обделки. В табл. 2 приведены безразмерные величины внутренних усилий в блочной обделке, как в бесшарнирной конструкции, от воздействия её собственного веса: изгибающие моменты M_θ нормированы на величину (GR / π) , нормальные силы - на величину (G / π) , где $G = 2\pi Rdb\gamma$ - вес кольца обделки шириной b , толщиной d , радиусом осевой линии R и с объёмным весом γ .

В указанных продольных сечениях, соответствующих зоне «отлипания» обделка, от окружающего грунтового массива под действием её собственного веса, которая в процессе проходки ликвидируется при тампонажных работах, нормальные силы условно приняты равными нулю.

Внутренние усилия от собственного веса обделки алгебраически суммируются с внутренними усилиями от воздействия горного давления транспортной нагрузки.

На втором этапе определения внутренних усилий с учётом частичной шар-

нирности в плоских стыках между блоками производится оценка изгибающих моментов в плоских стыках в результате их частичного раскрытия $M_{ст}$, исходя из гипотезы плоских сечений:

$$M_{ст} = EJ_{ст}/\rho_c \quad (6)$$

где E - модуль упругости материала изолирующей прокладки в плоском стыке; $J_{ст} = bx^3/12$ - момент инерции продольного сечения кольца обделки шириной b и высотой x по нераскрывшейся части толщины блоков обделки d ; ρ_c - радиус кривизны раскрытого плоского стыка.

Тогда величина изгибающего момента, разгружающего плоский стык при его раскрытии, может быть определена, как взятая с обратным знаком разность изгибающих моментов в бесшарнирном кольце M_θ и в плоском стыке $M_{ст}$, т.е.

$$M_p = -(M_\theta - M_{ст}) \quad (7)$$

После вычисления разгружающих изгибающих моментов в левом ($M_{пл}$) и правом ($M_{пр}$) стыках блоков обделки, можно определить изгибающий момент в середине рассматриваемого n -го блока следующим образом:

$$M_{\theta n} = M_\theta + 0,5(M_{пл} + M_{пр}) \quad (8)$$

Нормальную силу в середине рассматриваемого n -го блока $N_{\theta n}$ можно принять из расчёта обделки, как бесшарнирной конструкции.

Таблица 3

1 схема расположения блоков в кольце обделки

n	1	2	3	4	5	6
θ_n	0	60	120	180	240	300
θ_n	330	30	90	150	210	270
θ_n	30	90	150	210	270	330

Таблица 4

2 схема расположения блоков в кольце обделки

n	1	2	3	4	5	6
θ_n	30	90	150	210	270	330
θ_n	0	60	120	180	240	300
θ_n	60	120	180	240	300	360

Таблица 5

Расчётные внутренние усилия для 1и 2 схем расположения блоков в кольце обделки

θ , гр	Внутренние усилия в бесшарнирной конструкции						Внутренние усилия с учетом раскрытия стыков					
	от горного давления и транспортной нагрузки		от собственного веса		суммарные		изгибающий момент в стыке, $M_{ст}$, тм		разгрузочный изгибающий момент в стыке, M_p , тм		расчетный изгибающий момент в стыке, $M_{\theta n}$, тм	
	$M_{\theta n}$	$N_{\theta n}$	$M_{\theta n \cdot T}$	$N_{\theta n \cdot T}$	$M_{\theta n}$	$N_{\theta n}$	$M_{\theta n}$	$N_{\theta n \cdot T}$	$M_{\theta n \cdot T}$	$N_{\theta n}$	$M_{\theta n}$	$N_{\theta n}$
	тм	тм	м	м	тм	тм	тм	тм	м	тм	тм	тм
0	+5,00	-10,9	+0,54	0,00	1 +5,54	-10,90		+1,59		-3,95	+5,00	
30	+2,39	-20,0	+0,32	0,00	+2,71	-20,00	+2,17		-0,54			+0,74
60	-2,39	-40,0	-0,20	-0,58	-2,59	-40,58		-3,31 стык не раскроеется		0,00	-1,14	
90	-5,00	-40,0	-0,63	-1,00	-5,63	-41,00	-2,19		+3,44			-5,63
120	-2,39	-40,0	-0,57	-1,64	-2,96	-41,64		-3,08 стык не раскроеется		0,00	-1,47	
150	+2,39	-20,0	+0,31	-1,34	+2,70	-21,34	+2,23		-0,47			+0,50
180	+5,00	-10,9	+1,00	-0,99	+6,00	-12,00		+1,59		-4,41	+5,53	

В качестве числового примера, иллюстрирующего рекомендуемую расчётную схему по определению внутренних усилий в блочной обделке, рассмотрим блочную обделку с геометрическими па-

раметрами (наружный диаметр $D_H = 3,15$ м, внутренний диаметр $D_B = 2,75$ м, толщина блоков $d = 0,2$ м, ширина кольца $b = 1,0$ м) при глубине заложения

ния $H = 20$ м для двух схем расположения блоков в кольце (табл. 3 и 4).

В табл. 3 и 4 приняты следующие обозначения: θ - полярный угол, отсчитываемый от вертикального диаметра против часовой стрелки; n - номер блока; θ_n - угол середины блока; $\theta_{\text{п}}$ - угол правого стыка; $\theta_{\text{л}}$ - угол левого стыка. Результаты расчётов изгибающих моментов и нормальных сил в блочной обделке приведены в табл. 5.

По результатам изложенных исследований и анализа табл. 5 можно сделать следующие выводы.

1) При расчёте блочной обделки смещения породного контура коллекторного тоннеля следует определять по расчётной схеме в «снимаемых» напряжениях.

2) Частичное раскрытие стыков между блоками может быть учтено в результате перераспределения изгибающих моментов в бесшарнирной конструкции кольца обделки.

3) Учёт нагрузок от собственного веса обделки является обязательным, так как приводит к увеличению изгибающих моментов на 20 %.

4) Расчётные внутренние усилия в блочной обделке существенно зависят от схемы расположения блоков в кольце: для первой схемы, когда середины блоков расположены по вертикальному диаметру наиболее нагруженным будет лотковый блок; для второй схемы, когда середины блоков расположены по горизонтальному диаметру, наиболее нагруженным будет боковой блок.

5) Расчёт арматурного каркаса следует выполнять по внутренним усилиям в лотковом блоке при первой схеме расположения блоков в кольце, где изгибающий момент достигает максимального значения при минимальном значении нормальной силы сжатия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баклашов И.В., Картозия Б.А. Механика подземных сооружений и конструкции крепей - М.: Недра. 1961.

2. Родин И.В. Снимаемая нагрузка и горное давление В кн. Исследования горного давления - М.: Гостортехиздат, 1960.

3. Хлопцов В.Г., Баклашов И.В. О постановке задач при оценке устойчивости подземных горных выработок. - М.: МГГУ, ГИАБ, №4, 2004.

Коротко об авторах

Левченко Александр Николаевич – профессор Московского государственного горного университета.

