

К ВОПРОСУ ВЫБОРА НЕКОТОРЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБДЕЛОК БЕЗНАПОРНЫХ ТУННЕЛЕЙ, СООРУЖАЕМЫХ В УСЛОВИЯХ ВЫСОКОГО ГОРНОГО ДАВЛЕНИЯ

Кандидаты техн. наук В. Э. СТЕПАНЯН¹, А. А. СИМОНЯН²

Реферат. Сложный характер взаимодействия обделки с горным массивом исключает возможность строгого аналитического описания напряженно-деформированного состояния пород вокруг подземной выработки. В связи с этим для решения поставленной задачи по выбору основных параметров обделок туннелей здесь принят аналитико-экспериментальный подход. В результате исследований получены новые зависимости для определения параметров системы «обделка—массив». Достоверность полученной методики проверена на семи замерных станциях. Сравнение фактических результатов наблюдений с расчетными показало их хорошую сходимость. Выполненные исследования позволили определить рациональные области применения существующих конструкций обделок в зависимости от горно-геологических условий.

Проведение горной выработки нарушает первоначальное напряженное состояние горного массива. В результате концентрации напряжений в окрестностях выработки горные породы могут деформироваться. Если напряжения превышают предел прочности вмещающих пород, то вокруг выработки образуется зона неупругих деформаций.

Для исследования механизма взаимодействия обделки с массивом пород, а также процесса формирования зоны неупругих деформаций вокруг выработки проводились натурные экспериментальные наблюдения. Натурные наблюдения за проявлением горного давления проводились в туннелях Арпа—Севан, общая протяженность которых составляет 49,3 км, а также в железнодорожном туннеле Иджеван—Раздан и отводящем туннеле Жинвали ГЭС (ГССР) на двенадцати замерных станциях, которые были оборудованы: контурными реперами для замеров смещений контура выработки, глубинными реперами для наблюдений за зоной неупругих деформаций, диаметрическими секциями для определения контактных нагрузок на крепь. В местах установки замерных станций отбирались и испытывались образцы пород, вмещающих выработку. Прочность пород определялась по стандартной методике на образцах, полученных из кернов диаметром 42 мм и высотой, равной диаметру. Образцы готовились также в виде кубиков размерами 50×50×50 мм.

Замерные станции устанавливались у лба забоя на расстоянии 0,5—1,0 м. Инструментальные наблюдения проводились в начальный период через 3—10 дней, а по истечении двух месяцев промежуток времени увеличивались до одного и более месяцев.

¹ Зав. Ереванской лабораторией туннелей ГрузНИИЭГС.

² Ст. науч. сотр. Ереванской лаборатории туннелей ГрузНИИЭГС.

Контурные репера, представляющие собой металлические стержни длиной 0,5 м и диаметром 28 мм, располагались по периметру выработки: в кровле и боках.

Относительные смещения контура выработки определялись промерами между реперами, а абсолютные смещения рассчитывались по относительным, с помощью графо-аналитического метода (Заславский и др., 1978). Замеры осуществлялись рулеткой конструкции ЦНИИСа, обеспечивающей точность измерений в пределах 0,5 мм.

Глубинные репера (рис. 1) устанавливались в кровле и боках выработки. Глубинный репер представляет собой отрезок трубы с наружным диаметром 46 мм, снабженный тремя прикрепленными к ней с наружной стороны пружинными стопорами, обеспечивающими по типу «ерша» расклинивание в шпуре после досылки отрезка трубы на требуемую глубину. От каждой трубы по длине шпура отводится стальная проволока с маркированными кольцами.

Измерение смещений по глубинным реперам, установленным в кровле, производилось от диаметрально натянутой проволоки от двух наиболее глубоких анкеров, установленных в боках выработки и условно принятых за неподвижные. Величина смещений выработки в боках определялась промером удлинения проволоки, выходящей из двух диаметрально расположенных шпуров с последующим делением определяемой величины пополам.

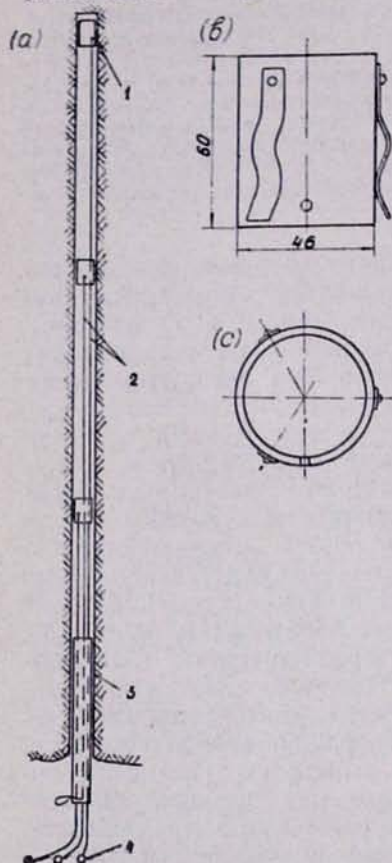


Рис. 1. Схема устройства глубинного репера: а) скважина с расположением анкера; б) фасад анкера; в) план анкера; 1—реперная головка; 2—стальная проволока; 3—обсадная труба; 4—металлические кольца с маркировкой.

Նկ. 1. խորային ռեպերի կառուցվածքի սխեմա. ա) խորանի գործը հորանցում, բ) խորանի ճակատը, զ) խորանի համակարգը. 1—ռեպերի գլուխը, 2—ստալային լար, 3—շրջապատ խողովակ, 4—սխիւսած մետաղե օղեր:

Fig 1. Diagram of depth bench mark: a) drill hole with arrangement of the anchor; b) front of the anchor; c) plane of the anchor. 1 is the bench mark head, 2 is a steel wire, 3 is the casing, 4 are the marked metall rings.

Для измерений контактных нагрузок на обделку использовались динамометрические секции с площадью загрузки в 2500 см², разработанные в Ереванской лаборатории туннелей ГрузНИИЭГС (Завриев и др., 1977).

Горно-геологическая обстановка заложения замерных станций и результаты проведенных натурных инструментальных наблюдений по ним сведены в таблицу.

Для оценки устойчивости пород при проведении туннельной выработки здесь принят параметр $\gamma H/R$ (Заславский и др., 1979), где $\gamma = \rho g$ — объемный вес породы, H — глубина заложения туннельной выработки от поверхности, R — сопротивление породы одноосному сжатию. Наблюдениями охвачен достаточно широкий диапазон горно-геологических условий, оценивающийся параметром устойчивости $\gamma H/R$ (в пределах от 0,37 до 2,6).

Результаты натуральных наблюдений за смещениями глубинных реперов показали, что в образующейся в процессе проведения туннельной выработки зоне неупругих деформаций пород можно выделить область, расположенную вблизи контура выработки, которая характеризуется интенсивным разрушением горных пород. Эта область интенсивного разрушения характеризуется значительными смещениями. Исследованиями (Протосеня, 1977; Черняк, 1972) установлено, что доля смещений в приконтурной зоне интенсивного разрушения составляет до 80% от общих смещений зоны неупругих деформаций. Правомочность этого положения доказывается результатами проведенных натуральных инструментальных наблюдений.

№ станции Հայանի № Sta. №	Обделка Բրեքարգում Lining	Толщина, мм Հաստությունը, մմ Thickness, mm	Порода Աղարկներ Rocks	$\frac{\gamma H}{R}$		Нагрузка, МПа Բեռնվածք, ՄՊա Load, MPa		Смещения, мм Տեղաշարժ, մմ Displacement, mm	
				кровля տանիք roof	бока կողք sides	кровля տանիք roof	бока կողք sides	кровля տանիք roof	бока կողք sides
1	жс	400	п	0.41	0.41	0.39	0.34	282	231
2	—	400	—	0.53	0.53	0.32	0.24	380	244
3	жб блоки	500	г	1.04	1.62	1.82	1.6	510	560
4	—	500	т	0.82	0.73	1.14	1.08	323	280
5	—	500	пв	1.38	1.38	1.86	1.3	650	390
6	—	500	аб	1.8	1.8	1.32	1.08	760	440
7	жк	650	—	0.56	0.78	0.72	1.6	280	294
8	—	650	бг	2.6	1.18	2.15	1.32	880	378
9	бс	650	г	1.97	0.72	1.8	0.72	760	384
10	—	400	а	0.37	0.37	0.28	0.24	244	148
11	—	600	гс	0.79	0.75	0.48	0.22	366	188

Примечания: жс — железобетонная сводчатая — երկաթբետոնե կամարան, reinforced concrete, arched; жб блоки — железобетонные блоки с податливыми прокладками — երկաթբետոնե բլոկներ դյուրափոփոխելի միջնաշերտերով — reinforced concrete with yielding packing; жк — железобетонная круговая — երկաթբետոնե շրջանան — reinforced concrete, circular; бс — бетонная сводчатая с последующим креплением двутаврами — բետոնե կամարան հետագա երկաթալան ամրացումով — concrete arched with subsequent strengthening by I-beams; п — песчанники — ավազաքարեր — sandstones; г — глины — կավեր — clays; т — туфобрекчин — առֆորրեկշիաներ — tuff breccia; пв — песчанники выветрелые — հողմանարված ավազաքարեր — weathered sandstones; аб — андезитовые брекции — андезитալիտային բրեկշիաներ — andesite breccia; бг — бурые глины — գորշ կավեր — brown clays; а — андезиты — андезитներ — andesites; станции № 1 — 10 в туннеле Арпа — Севан — № 1 — 10 կայանները Արփա — Սևան թունելում — Stas. 1 — 10 in the Arpa-Sevan tunnel; станция № 11 в туннеле Жинвали ГЭС — № 11 կայանը Ժինվալի ՀԷԻ թունելում — Sta. № 11 in the Zhinvali tunnel.

Вторая область, которая распространяется дальше в глубь массива, является переходной между разрушенными породами и областью, где напряжения не превышают предел упругости пород.

Исходя из вышесказанного, механизм взаимодействия обделок

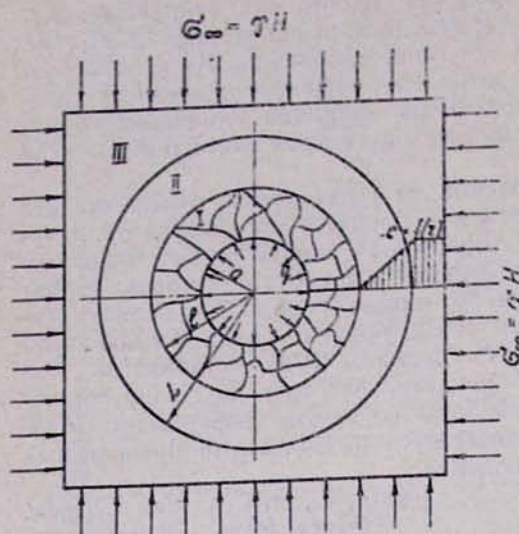


Рис. 2.

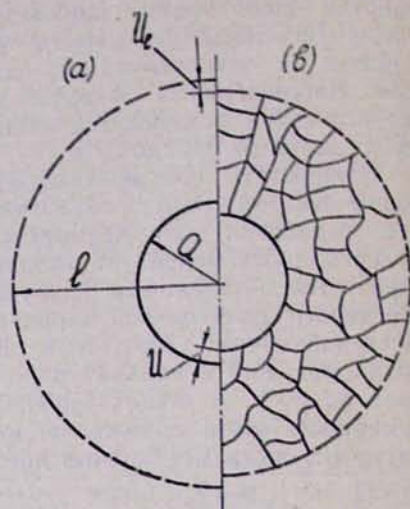


Рис. 3.

Рис. 2. Расчетная схема к исследованию механизма взаимодействия системы «обделка—массив».

Рис. 3. Схема к расчету смещений контура выработки: а) положение до деформации; б) положение после деформации.

Նկ. 2. «Երևարկում-զանգված» համակարգի փոխադրեցության մեխանիզմի ուսումնասիրության հաշվարկային սխեմա:

Նկ. 3. Հանգվալի ուղղաձի տեղաշարժերի հաշվարկի սխեմա. а) մինչ ձևափոխման վիճակ, б) ձևափոխման վիճակ:

Fig. 2. Design diagram for studying the interaction mechanism of the system "lining-massif".

Fig. 3. Diagram for calculating the opening contour displacement:

a is the state before deformation, b is the state after deformation

с породным массивом может быть представлен в виде приведенной на рис. 2 схемы.

Для вывода аналитических зависимостей, связывающих основные параметры геомеханической модели «обделка—массив» рассматривается задача о напряженно-деформированном состоянии массива вокруг выработки.

Решается плоская осесимметричная задача теории предельного равновесия со следующими граничными условиями: на контуре круглой выработки радиуса a , проведенной в изотропном горном массиве, действует равномерно распределенный отпор крепи q ; на бесконечности приложены напряжения, равные бытовым напряжениям в массиве $\sigma = \gamma H$.

После проведения туннельной выработки вокруг нее образуется зона неупругих деформаций радиусом L , породы в пределах которой находятся в предельном состоянии. В ней выделяется область приконтурной части породного массива, состоящая из разрушенных и разуплотненных пород радиусом l .

Равновесие системы «обделка—массив» рассматривается на конечный период существования выработки ($t = \infty$).

Аналитическое выражение, определяющее характер распределения напряжений в зоне неупругих деформаций, будет иметь вид

$$\left(\gamma H - \frac{\beta_1 R}{2 \cos \varphi}\right) (1 - \sin \varphi) = \beta_2 q \left(\frac{L}{a}\right)^{2\alpha} + \frac{\beta_3 R}{2\gamma(1-2\gamma)(L-l)} \left[2\alpha L + l(1-2\gamma) - l \left(\frac{L}{l}\right)^{2\alpha} \right]. \quad (1)$$

Согласно (Либерман, 1969) следует, что конечные смещения на границе зоны неупругих деформаций равны

$$U(L) = z \cdot L \frac{1+\mu}{E} T(L), \quad (2)$$

где μ — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости; $z = E_{\text{нр}}/E_{\text{э}}$ — реологический параметр; $T(L) = \frac{z_0(L) - z_r(L)}{2}$ — интенсивность напряжений на границе зоны неупругих деформаций.

Основные смещения в приконтурной зоне происходят в результате разрушения пород и увеличения их объема.

На рис. 3 приводится схема к определению смещений контура выработки от рыхления пород в зоне разуплотнения.

Исходя из предположения, что увеличение объема в приконтурной области характеризуется средним коэффициентом разрыхления $k_{\text{ср}}$, рассматриваемую схему можно описать уравнением

$$(l - U_{(l)})^2 - (a - U)^2 = k_{\text{ср}}(l^2 - a^2). \quad (3)$$

Решая уравнение (3) относительно смещения контура U и пренебрегая малыми величинами смещений второго порядка, с учетом уравнения (2) получим

$$\frac{U}{a} = \frac{k_{\text{ср}} - 1}{2} \left[\left(\frac{l}{a}\right)^2 - 1 \right] + \frac{zL^2(1+\mu)}{\beta_4 a^2 E} \left[\gamma H \sin \varphi + \frac{R}{2} (1 - \sin \varphi) \right]. \quad (4)$$

Уравнения (1) и (4) связывают основные параметры процесса взаимодействия системы «обделка—массив» и могут быть предложены для инженерных расчетов с учетом введения корректирующих коэффициентов β_1 ; β_2 ; β_3 ; β_4 , определяемых путем натурных инструментальных наблюдений. Характеристики породного массива (γ , E , μ , φ), входящие в выражения (1) и (4), определяются по среднестатистическим данным испытания пород рассматриваемой разновидности, значения z определяются согласно (Либерман, 1969). Степень разрыхления массива характеризуется углом наклона графиков смещений глубинных реперов к оси абсцисс, т. е. чем меньше угол наклона, тем выше степень разрыхления (Дружко и др., 1975).

Эмпирические коэффициенты β_1 и β_3 схожи по своему физическому смыслу и корректируют несоответствие прочности пород в образце и в массиве (масштабный фактор), а также длительную прочность пород. По своему физическому смыслу и характеру величина этих коэффициентов должна быть меньше 1, так как прочность породы в массиве меньше прочности в образце, а длительная прочность породы всегда меньше мгновенной.

Коэффициент β_2 учитывает неосесимметричность задачи, неравномерность отпора крепи по контуру туннельной выработки, коэффициент бокового распора породного массива. Для сложных инженерно-геологических условий он приближается к единице.

Коэффициент β_4 корректирует несоответствие принятых осредненных геотехнических характеристик в задаче и в натуре.

Учитывая, что прогноз проявления горного давления необходим в основном при проведении туннельных выработок в массиве, сложенном неустойчивыми трещиноватыми породами (глины, глинистые сланцы, аргиллиты, породы зон тектонического нарушения), рассмотрим применимость выражений (1) и (4) для прогноза смещений контура выработки в глинистых сланцах, для которых $\gamma = 23 \frac{\text{кН}}{\text{м}^3}$; $E =$

$2,1 \cdot 10^3 \text{ МПа}$, $\varphi = 22^\circ$; $\lambda = 1,5$; $\mu = 0,27$. Подставляя усредненные значения вышеуказанных характеристик горных пород, а также величины смещений и нагрузок по замеренным станциям и решая систему уравнений (1) и (4), определяем значения корректирующих коэффициентов, после подстановки которых окончательное выражение для расчета параметров взаимодействия системы «обделка—массив» для кровли и боков туннельной выработки будет иметь вид:

$$\left\{ \begin{aligned} 0,625 \left(\frac{\gamma H}{R} - 0,24 \right) &= 0,91 \frac{q}{R} \left(\frac{L}{a} \right)^{1,2} - \frac{1}{1,9(L-l)} \left[1,2L - 0,2l - l \left(\frac{L}{l} \right)^{1,2} \right] \\ \frac{U}{a} &= 0,054 \left(\frac{l^2}{a^2} - 1 \right) + \frac{L^2 R}{2760 a^2} \left(0,75 \frac{\gamma H}{R} + 0,625 \right), \end{aligned} \right. \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{aligned} 0,625 \left(\frac{\gamma H}{R} - 0,24 \right) &= 1,16 \frac{q}{R} \left(\frac{L}{a} \right)^{1,2} - \frac{1}{1,84(L-l)} \left[1,2L - 0,2l - l \left(\frac{L}{l} \right)^{1,2} \right] \\ \frac{U}{a} &= 0,04 \left(\frac{l^2}{a^2} - 1 \right) + \frac{L^2 R}{2640 a^2} \left(0,75 \frac{\gamma H}{R} + 0,625 \right). \end{aligned} \right. \quad (6)$$

Проверка этих зависимостей по результатам натуральных инструментальных наблюдений на семи замерных станциях показала, что отклонение расчетных значений смещений контура выработки и нагрузок на обделку от фактических, замеренных в натуре не превышает в худшем случае для пород кровли 29% и для пород боков туннеля 26%.

Разработанную методику можно применять для выбора параметров обделок горизонтальных безнапорных туннелей, проводимых на глубинах от 100 до 800 м, в породах с пределом прочности на простое сжатие до 50 МПа.

На основании обработки результатов натуральных инструментальных наблюдений за проявлением горного давления, а также разработанного метода прогноза установлены области применения различных конструкций обделок в зависимости от устойчивости породных обнажений.

При $\frac{\gamma H}{R} < 0,3$ выработка устойчива на весь срок службы сооружения. Деформации контура здесь не превышают 60—80 мм. Выработки подобного типа могут поддерживаться легкими выравнивающими обделками, принимаемыми конструктивно, исходя из условий назначения сооружения.

В диапазоне $0,3 < \frac{\gamma H}{R} < 0,5$ породы среднеустойчивы, возникают локальные области разрушения пород. Смещения контура выработки порядка 100—250 мм. Обрушаясь, породы оказывают давление

на обделку за счет собственной массы, обуславливая работу ее в режиме заданной нагрузки. Применяются бетонные, железобетонные обделки с временной крепью, сборные железобетонные тубинги.

В диапазоне условий $0,5 < \frac{\gamma H}{R} < 0,8$ породы неустойчивы. Смещение контура выработки порядка 250—400 мм. Вокруг выработки с течением времени образуется сплошная зона неупругих деформаций, связанная с разрушением и пластичным течением пород. Обделка в этих условиях работает вместе с породами приконтурной зоны в режиме заданной деформации. Применяются замкнутые бетонные, железобетонные монолитные обделки с временной металлической крепью арочной формы. Обязательна технологическая податливость порядка 100—300 мм. Монолитная обделка должна возводиться с отставанием от забоя на 15—20 м.

При $\frac{\gamma H}{R} > 0,8$ породы сильно неустойчивы. Смещение контура выработки превышает 400—500 мм. Вокруг выработки образуется значительная зона неупругих деформаций. Увеличение объема пород в этой зоне вызывает смещение контура выработки, которые технически выполнимая обделка не в состоянии предотвратить. Обделка в этих условиях работает вместе с породами приконтурной зоны в режиме взаимовлияющей деформации.

Применяются железобетонные сборные обделки с податливыми полипластовыми прокладками, железобетонные сборные обделки с внешним податливым слоем, обеспечивающим податливость 250—350 мм. Обязательна нагнетательная цементация.

ԲԱՐՁՐ ԼՅՈՒՆՅՈՒՆ ԺՆՇՄԱՆ ՊԱՅՄԱՆՆԵՐՈՒՄ ԿԱՌՈՒՅՎՈՂ ԱՆՆՇՆՈՒՄՅՈՒՆ ԹՈՒՆԵԼՆԵՐԻ ԵՐԵՍԱՐԿՄԱՆ ՈՐՈՇ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԸՆՏՐՈՒԹՅԱՆ ՀԱՐՅԻ ՄԱՍԻՆ

ՎԻԼԻՆ ՍՏԵՓԱՆՅԱՆ¹, տեխ. գիտ. թեկն., ԱՐԱՄԱՅԻՍ ՍԻՄՈՆՅԱՆ², տեխ. գիտ. թեկն.

ՌԵՖԵՐԱՏ: Ընտանյին զանգվածների հետ երեսարկման փոխհարաբերության բարդ բնույթը բացատրում է ստորգետնյա հանվածքի շուրջը ազարի հիգուսիզ միճակի ստույգ անալիտիկ նկարագրի հնարավորությունը: Այդ կապակցությամբ, թունելների երեսարկման հիմնական պարամետրերի բնարտման խնդիրը լուծելու համար աշտակ ընդունվել է անալիտիկ-փորձարարական մոտեցումը: Ուսումնասիրությունների հետևանքով նոր հարաբերություններ են ստացվել «երեսարկում-զանգված» համակարգի պարամետրերի որոշման համար: Ստացված մեկնողական ճշտությունը ստուգվել է յոթ չափիչ կայաններում: Դիտումների փաստական արդյունքների համեմատությունը հաշվարկայինների հետ ցույց է տվել դրանց լավ համապատասխանությունը: Իրականացված ուսումնասիրությունները թույլ տվեցին որոշել երեսարկման զուգային ունեցող կառուցվածքների կիրառման ազդեցության բնագավառները՝ կախված ընտանյին և երկրաբանական պայմաններից:

¹ Վրաց. հիդրոտեխնիկական կառուցվածքների էներգետիկայի ԳՀԻ երևանի թունելների լաբորատորիայի վարիչ:

² Վրաց. հիդրոտեխնիկական կառուցվածքների էներգետիկայի ԳՀԻ երևանի թունելների լաբորատորիայի ավագ գիտաշխատող:

ON CHOICE OF PRESSURELESS TUNNELS LINING PARAMETERS
BUILT AT HIGH ROCK PRESSUREVILEN STEPANIAN¹, Cand. Sc. (Eng.), ARAMAIS SIMONIAN², Cand. Sc. (Eng.)

Synopsis. The intricate character of the interaction between lining and rock-mass excludes the possibility of a strict analytical description of the stress-strain state of rocks around the underground opening. The analytical-experimental approach is accepted to solve the problem of the choice of basic parameters of tunnel lining. New relationships for determining the parameters of the system «lining-massif» were obtained as a result of investigations. The validity of the obtained methods is tested at seven measuring stations. The comparison of actual results of observation with calculated ones showed a good conformity. The performed investigations allowed to define the rational fields of application of existing lining structures depending on mining and geological conditions.

ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ—ЛИТЕРАТУРА—REFERENCES

- Дружко Е. Б., Заславский Ю. З., Перепичка Ф. И. 1975. Устойчивость основных горных выработок. Донецк.
- Завриев Г. П., Петросян Г. М., Симонян А. А. 1977. Методика экспериментального определения горного давления в глинистых породах. — Сб. ГрузНИИЭГС, М., Энергия, вып. 5, с. 105—108.
- Заславский И. Ю., Марков А. И., Пшеничный В. А. 1978. Упрощенный метод определения смещений контура выработки. — В кн.: Строительство предприятий угольной промышленности, М., ЦНИИЭуголь, вып. 3, с. 13—14.
- Заславский Ю. З. и др. 1979. Крепление подземных сооружений. М., Недра.
- Либерман Ю. М. 1969. Давление на крепь капитальных выработок. М., Наука.
- Протосеня А. Г. 1977. Прогнозирование перемещений массива вокруг горных выработок с учетом разрыхления пород в пластической зоне. — Шахтное строительство, № 7, с. 17—19.
- Черняк И. Л. и др. 1972. Исследование процесса деформации пород вокруг подготовительных выработок. — В кн.: Технология добычи угля подземным способом. М., ЦНИИЭуголь, вып. 8, с. 14—15.

¹ Head, Yerevan Laboratory of Tunnels, the Georgian Scientific Research Institute of Energetics and Hydrotechnical Structures.

² Senior scientific worker, Yerevan Laboratory of Tunnels, the Georgian Scientific Research Institute of Energetics and Hydrotechnical Structures.