

В.Д. Петренко, А.Л. Тютюкин,  
В.И. Петренко,

## ОБЗОР АНАЛИТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАССИВА И КРЕПИ

В статті наведено огляд аналітичних та експериментальних методів дослідження взаємодії масиву та кріплення. Результати експериментів з використанням відцентрового моделювання показали ряд особливостей гірського тиску, які розглянуті в аналітичному огляді.

В статье приведен обзор аналитических и экспериментальных методов исследования взаимодействия массива и крепления. Результаты экспериментов с использованием центробежного моделирования показали ряд особенностей горного давления, которые рассмотрены в аналитическом обзоре.

In the article the review of analytical and experimental methods of research of co-operation of massif and support is resulted. The results of experiments with the use of centrifugal design showed the row of features of mountain pressure, considered in an analytical review.

При проектировании и строительстве тоннелей, метрополитенов и других подземных сооружений, выборе эффективных технологических схем проведения выработок изучаются свойства грунтов и горных пород и явления, которые происходят в массивах.

Одной из сложных задач механики подземных сооружений является определение характера взаимодействия грунтового массива с постоянной или временной крепью, возводимой обычно в забое выработки. Для решения задач подобного класса обычно применяют аналитический или экспериментальный методы. Аналитический метод позволяет при некоторых допущениях определить параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтов или горных пород в окрестности выработки. Однако из-за трудности выбора структурно-механической модели среды и определения аналитическим путем указанных параметров требуется обычно проводить натурные эксперименты с установкой тензодатчиков или мессдоз в наиболее опасных участках горной выработки и получать константы, используемые в дальнейшем в аналитических построениях и расчетах. Обычно в этом случае реализуется комбинированный вариант исследований – аналитико-экспериментальный. Однако возникают сложности проведения промышленных экспериментов, при которых невозможно изучить весь комплекс инженерно-геологических условий, и особенно, точно зарегистрировать показатели, включая реологические, в связи с подвижением забоя выработки. Наиболее приемлемым в этом случае является применение метода моделирования [1-6].

Обычно изучение и оценка соответствия

расчетных методов выбранным условиям требуют в большинстве случаев специальных знаний в области механики сплошных сред, теории упругости, пластичности, ползучести и других наук и составляют основу механики подземных сооружений. Последние десятилетия теоретические исследования горного давления развивались в четырех основных направлениях.

Первое направление включает в себя исследование проявлений горного давления без учета взаимодействия массива и крепи выработок, основанные на данных практики и следующих специальных гипотезах с использованием приближенных инженерных методов расчета:

1) гипотеза свода давления (обрушения), предложенная М. М. Протоджяконовым [7] и П. М. Цимбаревичем [8];

2) гипотеза об образовании призмы сползания в боках выработки, развитая в трудах М. П. Бродского [9] и К. Терцаги [10];

3) гипотезы Н.М. Покровского [11, 12] и В.В. Орлова [13], основанные на наблюдениях практики;

4) гипотезы В.Д. Слесарева [14], А.П. Германа [15] и А.И. Сегалю [16], подкрепленные расчетными положениями на основе аппарата теории упругости и строительной механики.

Согласно Н. С. Булычеву [17] перечисленные гипотезы относятся к классу гипотез сил, в которых нагрузка на крепь рассматривается как вес некоторого объема пород в пределах свода обрушения или призмы сползания. Положение о возникновении свода давления над выработкой, расположенной на определенной глубине от поверхности, впервые было сформулировано В. Риттером [18] и в дальнейшем развито в трудах М. М. Протоджяконова [7], П. М. Цимбаревичем

вича [8] и др. [9-11]. В основу теории свода М. М. Протодяконова положен тезис о том, что горные породы из-за множества микро- и макродефектов (трещины различного уровня), ослабляющих их структуру или разбивающих на отдельные куски, не являются сплошными телами. Следовательно, к ним могут быть применены законы сыпучих тел с некоторой поправкой, которая учитывает силы сцепления между отдельными кусками и частицами. М. М. Протодяконов предложил учитывать эти силы путем введения кажущегося коэффициента крепости. Согласно этой теории в кровле горизонтальной выработки формируется свод давления параболического очертания, который своим весом воздействует на постоянную крепь. Причем, делается допущение, что величина давления и размеры свода не зависят от глубины заложения выработки и механических характеристик крепи. В теории М. М. Протодяконова предполагается, что пролет свода давления равен ширине выработки, а в ее боках залегают прочные породы, на которые опирается свод.

П. М. Цимбаревич [8] развил теорию свода, выдвинув положение о том, что он имеет пролет больше ширины выработки, так как боковые породы часто являются неустойчивыми. Под действием веса вышележащих пород в пределах свода давления боковые породы начинают сползать, что вызывает возникновение бокового давления на крепь. Его величину П. М. Цимбаревич предложил определять как активное давление на подпорную стенку оползающих призм, нагруженных весом пород параболического свода.

Критический анализ позволяет сделать вывод о том, что объемные силы от совместного действия свода давления и призмы на временную крепь не рассматриваются. Особенно важным является данный вывод для расчетов несущей способности временной крепи выработка большого поперечного сечения, проходящих в пластичных неустойчивых грунтах.

В основу гипотез второго направления положен деформационный подход, впервые фундаментально разработанный Р. Феннером [19]. В основе работ второго направления лежит гипотеза деформаций, согласно которой давление на крепь является результатом перемещения пород по контуру выработки и упругого отпора со стороны крепи при их взаимодействии, пока не устанавливается состояние равновесия. Это равновесие может быть достигнуто при различных величинах давления пород на крепь в зависимости от конструкции и материала крепи, а

также от времени ее ввода в работу. В ряде работ этого направления для определения горного давления предложено использовать методы теории упругости, считая породы однородными и изотропными. Академиком Г. Н. Савиным [20] решена контактная задача для условий мгновенной установки крепи в выработке в момент проходки и получена прямо пропорциональная зависимость между величиной горного давления и глубиной заложения выработки. Однако это не всегда подтверждается на практике. К. В. Руппнейт [21] установил, что область неупругих деформаций вокруг горизонтальной выработки имеет овальную форму. В основу его исследований положена расчетная схема, близкая к действительной в натуральных условиях, в которой учитывается изменение величины горного давления от глубины заложения выработки, податливости крепи, геометрических размеров выработки и физико-механических свойств пород. Вместе с тем, ряд параметров трудно определить в производственных условиях.

А. Лабассом [22] предложена гипотеза горного давления вокруг горизонтальной выработки, основанная на допущении возникновения трех зон: неупругих деформаций, повышенных напряжений и зоны с напряжениями, убывающими до значений в массиве. Согласно гипотезе А. Лабасса, давление на крепь выработки обусловлено тем, что напряжения, возникающие в породах в пределах зоны разрушения (разрыхления), превышают предел их прочности на одноосное сжатие.

Сущность третьего направления исследований горного давления заключается в оценке потери устойчивости массива, вызывающей изменение формы выработки. Это направление представлено в основном работами Л. В. Ершова и Л. Н. Насонова [23].

В последние годы получил свое развитие вероятностно-статистический подход к развитию теории горного давления и устойчивости выработок, представленный в работах А. Н. Шашенко, Л. Я. Парчевского и др. [24, 25].

Важные предложения относительно понимания проявлений горного давления внесли А. М. Зорин, В. Г. Колесников и др. [26]. Эти положения связаны с пониманием массива как единой динамической системы породных разностей, которые имеют упруго-вязкопластические свойства и рассматриваются в контексте энергетического подхода к проявлениям горного давления. В работе [26] также

показано, что подход к горному давлению с позиций макромеханики сплошной среды и механики твердого деформируемого тела исчерпал себя и нужен новый подход, связанное с исследованием причин горного давления, в том числе и на микроуровне.

Таким образом, во всех рассмотренных работах предложены условия взаимодействия крепи и окружающих пород и на этой основе выбираются параметры и материал крепи и технология ее возведения. Очевидно, что в них недостаточно данных для определения характера поведения грунтового массива и его воздействия на временную крепь при разработке забоя выработки большого диаметра на полное сечение.

В связных грунтах методы расчёта горного давления, основанные на определенных положениях механики сплошной среды, должны быть обусловлены границами применимости путём чёткого разделения упругой и пластической зон. При этом, при определении напряжений в массиве нужно исходить из следующих положений. Прежде всего, рассматриваются напряжения в весоном полупространстве при давлении на контуре выработки, равном нулю, либо не равном нулю. Причём, радиальные напряжения зависят от радиуса выработки и глубины её заложения.

Наибольшие напряжения, вызывающие появление пластической зоны, имеют место непосредственно на контуре выработки при давлении, равном нулю, а момент появления пластических деформаций соответствует условию  $\sigma_{min}=0$ . Причем, наиболее опасные напряжения возникают на пересечении горизонтального диаметра с контуром выработки. Данные выводы справедливы при условии, что жёсткость обделки не оказывает влияния на величину возникающего горного давления.

Для определения давления на крепь горизонтальной выработки круглого сечения используются формулы, в которых учитываются силы тяжести, бокового давления (распора) и смещения контура выработки по горизонтали, вертикали и под углом  $45^\circ$ . Однако получаемые смещения контура выработки и величины давления не всегда согласуются с данными экспериментальных измерений, поэтому для исследования НДС пород вокруг выработки используются методами теории упругости и пластичности.

Исследованиями академика А. Н. Динника [27] установлено, что на контуре выработки после образования пластической зоны во всех

точках происходит сжатие, а смещения грунта в момент образования зоны отсутствуют, то есть он находится в состоянии предельного равновесия. Причем, при наличии крепления условие возникновения зоны пластических деформаций с увеличением глубины практически не изменяются. Вместе с тем, при реальных оценках НДС необходимо учитывать скорость деформации грунта на контуре выработки, причём, она не должна превышать предельной величины. При быстром течении грунта произойдёт интенсивное образование разрывов сплошности (трещин), за которыми последует вывал грунта. Предотвращение данного явления должно обеспечиваться выбором соответствующей технологии производства работ на основе обоснования и расчёта её эффективных параметров. Причем, при любой технологии особое значение должно придаваться плотному соприкосновению постоянной крепи (обделки) с окружающим массивом либо за счёт нагнетания за обделку раствора либо её обжатия в грунт.

В особых грунтовых условиях при определении горного давления часто пользуются методами, основанными на теории сводообразования [28]. При этом необходимым условием для образования свода является получение его предельного пролёта:

$$L_{np} = 7\sigma_p / \gamma$$

где  $\sigma_p$  – предел прочности грунта на растяжение,  $\text{кН/м}^2$ ;  $\gamma$  – объёмный вес грунта,  $\text{кН/м}^3$ .

Основным недостатком существующих теорий является то, что при их применении не учитывается жёсткость крепи. Вместе с тем экспериментально установлено [29] её существенное влияние на величину горного давления и его развитие во времени. Кроме того, в них не рассматриваются длительность взаимодействия подземной конструкции с массивом. Поэтому теорию сводообразования можно рассматривать как описывающую одну из стадий развития во времени горного давления, а именно, как период его стабилизации в условиях предельного равновесия.

Определение горного давления на обделку тоннеля чаще всего решается на основе смешанной теории, включающей в себя теорию упругости и теорию равновесия грунтовых масс [7-9, 29]. Выбранный метод позволяет в каждом отдельном случае подойти к определению горного давления в различные промежутки времени при определенных условиях.

В процессе проходки выработки горные породы приходят в движение, так как крепление в ней невозможно установить сразу же вслед за разработкой грунта. Вследствие этого грунт в течение определенного времени свободно деформируется и величина деформаций зависит от жесткости крепи. Деформация глинистого грунта впереди забоя по исследованиям [29] происходит под углом к горизонту, близким к  $80^\circ$ , в плоскости, перпендикулярной оси тоннеля – под углом  $45^\circ + \varphi/2$  [10].

Возникающие в глинистых грунтах напряжения являются растягивающими. В процессе деформаций над выработкой образуется первоначальный свод, очертание которого определяется их величиной и существующего в грунте внутреннего давления. Высота этого свода по данным исследований [29] может достигать 0,15...0,5 высоты выработки.

По данным Метрогипротранса [30] давление грунта над выработкой определяется как

$$q = \frac{\gamma D}{f} \left[ 1 + tg \left( 45^\circ - \frac{\bar{\varphi}}{2} \right) \right], \text{ кН/м}^2$$

где  $\gamma$  – плотность грунта,  $\text{кН/м}^3$ ;  $D$  – диаметр выработки, м;  $f$  – коэффициент крепости пород по Продольяконову;  $\bar{\varphi}$  – кажущийся угол внутреннего трения, град.

Как отмечает В. И. Заворичий [29], максимальная величина давления составляет

$$q = 0,354\gamma L^2,$$

где  $L$  – ширина призмы обрушения, равная

$$L = D \left[ 1 + tg \left( 45^\circ - \frac{\bar{\varphi}}{2} \right) \right] \text{ м.}$$

Кроме исследования горного давления на основе аналитических методов существуют и экспериментальные методы исследований, которые включают метод фотоупругости, тензометрии и центробежного моделирования. Однако два первых метода не обеспечивают достаточно полного подобия поведения натурального объекта и его модели и не позволяют воспроизвести изучаемые явления и процессы. В результате можно получить лишь качественное представление о них при определенных количественных характеристиках влияния некоторых факторов и отдельных состояний системы. Так, например, при использовании метода фотоупругости на моделях из оптически прозрачных материалов невозможно воспроизвести процессы образования разрывов сплош-

ности и поверхностей призмы сдвижения в грунтах. Использование метода тензометрии позволяет определить количественные характеристики НДС в модели системы «массив – крепь». Вместе с тем напряжения и деформации в модели не будут равны им в натуре. При физическом моделировании изучаемая система «грунтовой массив – крепь горной выработки» воспроизводится с помощью модели сооружения, имеющей меньшие геометрические размеры. При этом на модели натурные процессы воссоздаются таким образом, чтобы получить необходимую информацию наиболее просто, быстро, дешево, надежно, а в некоторых случаях и более полно, чем при наблюдениях на натурном объекте. Однако при обычном физическом моделировании поведения подземного сооружения в грунтовой массиве нелинейный характер связи между напряжениями и деформациями приводит к некоторому искажению картины системы «массив – выработка» при условии, что прочность материала модели равна прочности материала натуре. При применении метода эквивалентных материалов, когда прочность материала модели меньше прочности материала натуре необходимо увеличивать геометрический масштаб моделирования пропорционально изменению отношения плотности натуре и модели. При этом достигается равенство механических характеристик модели и натуре. Данное условие можно реализовать, используя в модели массива не искусственные материалы, а природные грунты или породы.

Чтобы достичь полного подобия модельного и натурального объектов, обеспечить равенство напряжений и пропорциональность деформаций, а также получить объективную качественную картину деформирования подземного сооружения в целом необходимо увеличить вес единицы материала модели с помощью сил инерции, которые возникают при вращении модели в центрифуге с соответствующей скоростью. Этот метод центробежного моделирования для задач определения горного давления был предложен Г. И. Покровским [2] и усовершенствован им совместно с И. С. Фёдоровым и другими авторами [1, 3-6]. Сущность метода центробежного заключается в том, что в качестве силового поля, подобного гравитационному, используется поле центробежных сил. При этом область данного поля, в которой размещается модель, должна быть настолько

удалена от оси вращения, а частота вращения такой значительной, чтобы можно было пренебречь влиянием сил гравитации, приводящих к искажению результирующего поля сил при моделировании. В этом случае лишь масштаб времени протекания исследуемых процессов изменяется с автоматическим сохранением их физической природы. Этот метод, кроме того, позволяет установить качественную картину и количественные характеристики деформирования грунта и подземного сооружения. Знание общего характера деформирования имеет большое значение для правильной постановки теоретических исследований и для объяснения тех или иных явлений, происходящих в натуральных условиях. Развивающиеся в результате вращения центрифуги центробежные силы приводят к распределению плотности аналогично тому, как это происходит в реальных условиях деформирования. Знание общего характера деформирования имеет большое значение для правильной постановки теоретических исследований и для объяснения тех или иных явлений, происходящих в натуральных условиях. Развивающиеся в результате вращения центрифуги центробежные силы приводят к распределению плотности аналогично тому, как это происходит в реальных условиях. Поэтому опыты на центрифуге позволяют точнее учесть влияние собственного веса на форму и относительные размеры деформируемых массивов грунта и выработок, располагаемых в них.

При применении метода центробежного моделирования возникает ряд задач, вызванных необходимостью соблюдения безразмерных критериев физического подобия, включая геометрическое и динамическое подобие, то есть силовое. Причем данное положение в полной мере относится как к параметрам грунтового массива, так и к конструктивным особенностям и механическим характеристикам самой крепи. Это предопределяет основы используемого метода. Поэтому опыты на центрифуге позволяют точнее учесть влияние собственного веса на форму и относительные размеры деформируемых массивов грунта и выработок, располагаемых в них.

Таким образом, центробежное моделирование обеспечивает полное сохранение характера протекающих в грунте и подземной конструкции процессов. Причём при использовании данного метода сложные зависимости и недостаточно исследованные в на-

стоящее время неизвестные факторы действуют в модели автоматически. Эти обстоятельства обусловили выбор метода центробежного моделирования для проведения экспериментальных исследований. При этом моделировались залегающие в натуральных условиях грунты: культурный слой, супесь, водонасыщенные пески и глина.

При изготовлении модели и помещении её в кассету центрифуги соблюдали геометрическое подобие стратиграфической колонки и выработки в натуре и модели:

$$m_l = \frac{L}{l} = \frac{H}{h} = \frac{D}{d}$$

где  $m_l$  – коэффициент геометрического подобия;  $L, H, D$  и  $l, h, d$  – соответственно линейные размеры натурального объекта и модели (рис. 1).

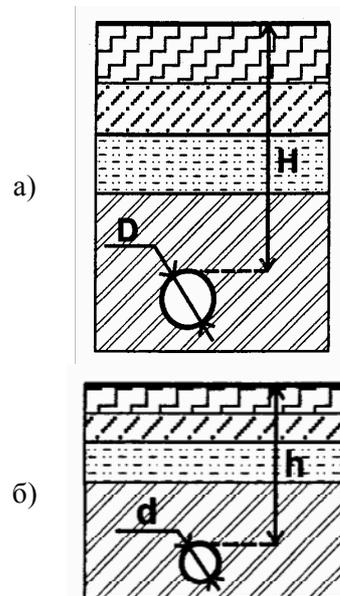


Рис. 1. Схема размещения выработки а) и её модели б) в массиве

Для выполнения динамического (силового) подобия учитывали следующие соотношения:

$$\begin{aligned} G_H &= \gamma_H L^3 = \rho_H g L^3, \\ G_M &= \gamma_M l^3 = \rho_M \omega l^3, \\ F_H &= L^2; & F_M &= l^2, \\ \sigma_H &= G_H / F_H = \rho_H g L, \\ \sigma_M &= G_M / F_M = \rho_M \omega l, \end{aligned}$$

где  $G_H$  и  $G_M$ ,  $\gamma_H$  и  $\gamma_M$ ,  $\rho_H$  и  $\rho_M$ ,  $F_H$  и  $F_M$ ,  $\sigma_H$  и  $\sigma_M$  – соответственно веса, удельные веса, плотности, площади и напряжения в натуре и модели;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\omega$  – центробежное ускорение.

При соблюдении условий  $\sigma_H = \sigma_M$  и  $\rho_H = \rho_M$

$$\omega = gL/l = gm_l,$$

то есть центробежное ускорение должно быть больше ускорения силы тяжести во столько раз, во сколько линейный размер натурального объекта больше такого же размера модели. Было выполнено моделирование процесса сдвижения грунтового массива в обнаженный забой выработки при  $m_l = 100$ , при внешнем диаметре выработки в натуральных условиях, равном 8,5 м, диаметр модели выработки был равен 8,5 см. Число оборотов центрифуги достигало 200 об/мин.

В результате выполненных экспериментов

было установлено, что призма сдвижения грунта над выработкой в модели распространяется примерно на высоту выработки. Кроме того, было установлено, что поверхности сдвижения (скольжения) от срединного диаметра вверх в сечении, перпендикулярном оси выработки, имеют криволинейный характер. Вместе с тем поверхность сдвижения в продольном сечении выработки имеет прямолинейное очертание (рис. 2).

Полученные результаты позволили уточнить объёмные силы, действующие в пределах призмы сдвижения на временную крепь в забое горизонтальной выработки большого сечения – стационарного тоннеля.

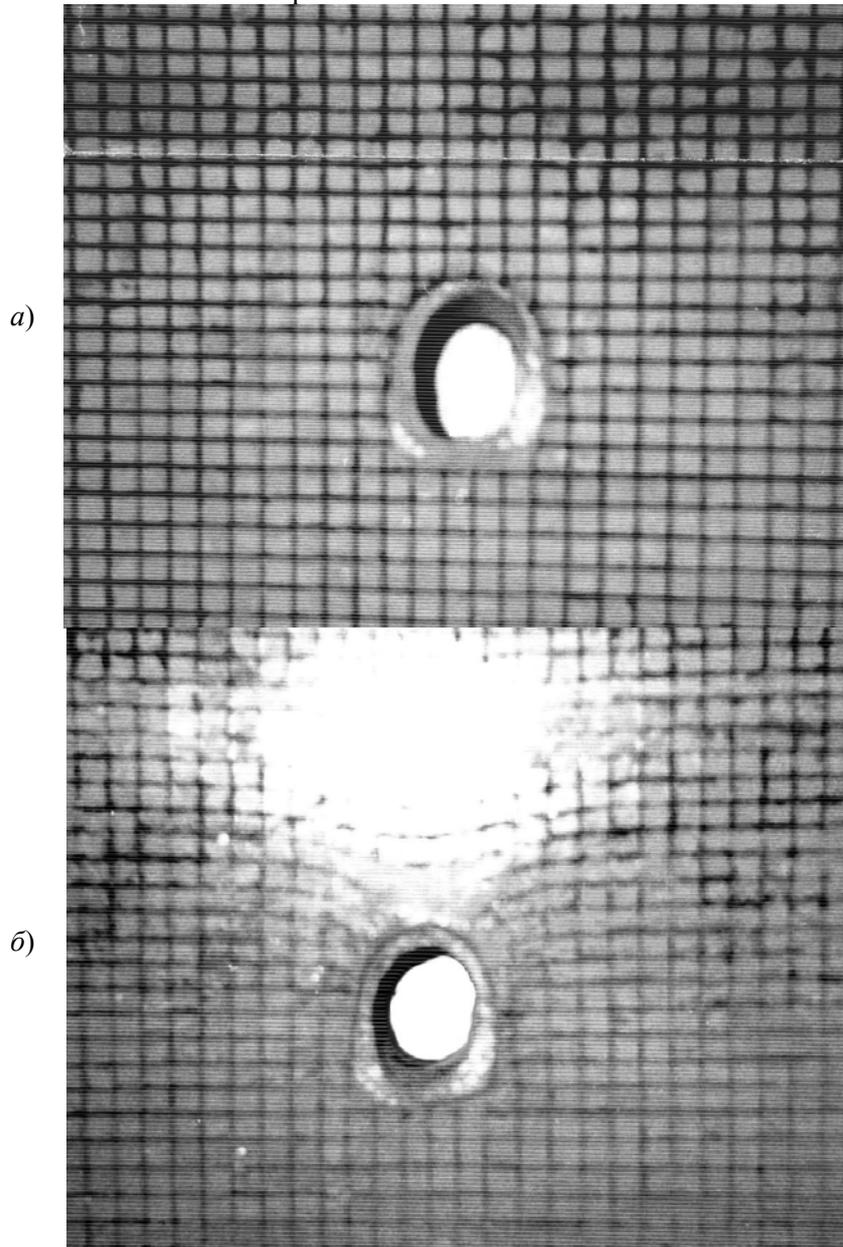


Рис. 2. – Вид модели до эксперимента (а) и после (б)

В настоящее время современные методы расчета горного давления постоянно развиваются. Вместе с тем проблема определения горного давления на основе аналитических методов осложнена наличием большого количества факторов, которые нужно учитывать. В этой связи в науке о горном давлении существует большое количество гипотез и методов, не объединенных в одну систему основополагающими принципами.

Многообразие гипотез и методов требует строгой их классификации, познания и совершенствования, как самих расчетных методов, так и умения устанавливать соответствие метода инженерно-геологическим и технологическим условиям проведения выработки.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование проявлений горного давления / Г.М. Кузнецов, М.Н. Будько, Ю.Н. Васильев и др. – Л.: Недра, 1968. – 280 с.
2. Покровский Г.И., Федоров И.С. Центробежное моделирование в горном деле. – М.: Недра, 1969. – 263 с.
3. Насонов И.Д. Моделирование горных процессов – М.: Недра, 1978. – 256 с.
4. Теория и практика центробежного моделирования в строительстве. / И.С. Федоров, В.Г. Мельник, А.И. Тейтембаум и др. – М.: Стройиздат, 1984. – 286 с.
5. Моделирование в геомеханике / Глушихин Ф.П., Кузнецов Г.Н., и др. – М.: Недра, 1991. – 240 с.
6. Алексеенко С.Ф., Заболотный А.Г., Штанько Л.А. Основы моделирования при решении задач горной геомеханики. – Киев: Техніка, 1996 – 173 с.
7. Протодяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. – ч.2. Рудничное крепление. – М.: Гостехиздат, 1933. – 127 с.
8. Цимбаревич П.М. Механика горных пород. – М.: Углетехиздат, 1948. – 183 с.
9. Бродский М.П. Новая теория давления пород на подземную крепь. – М.-Л.: ОНТИ, 1933. – 72 с.
10. Терцаги К. Теория механики грунтов. – М.: Госстройиздат, 1961. – 507 с.
11. Покровский Н.М. Сооружение и реконструкция горных выработок. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 379 с.
12. Покровский Н.М. Комплексы подземных горных выработок и сооружений. – М.: Недра, 1987. – 248 с.
13. Орлов В.В. Проведение и крепление горных выработок. – М.: Недра, 1965. – 496 с.
14. Слесарев В.Д. Крепление горных выработок. – М.-Л.: Углетехиздат, 1958. – 259 с.
15. Герман А.П. Горная механика. – М.-Л.: ОНТИ, 1935 – 319 с.
16. Сегаль А.И. Основы статики сооружений. – М.-Л.: ОНТИ, 1935 – 255 с.
17. Булычев Н.С. От гипотез горного давления к теории расчета подземных сооружений. / Сб. трудов науч.-техн. конф. «Подземное строительство России на рубеже XXI века», Москва 15-16.03.2000. – М.: ТАР, 2000. – С. 105-111.
18. Глушко В.Т., Широков А.З. Механика горных пород и охрана выработок. – Киев: Наукова думка, 1967. – 154 с.
19. Феннер Р. Исследование горного давления. / В кн.: Горное давление. – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 5-58.
20. Савин Г.Н. О реологических моделях механики горных пород / Мат-лы семинара «Вопросы теоретической и экспериментальной реологии горных пород» – вып.1. – Киев: Наукова думка, 1972. – С. 3-15.
21. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород. – М.: Углетехиздат, 1954. – 354 с.
22. Лабасс А. Давление горных пород в угольных шахтах / Сб. переводов «Горное давление». – М.: Госгортехиздат, 1961. – С. 59-164.
23. Ершов Л.В., Максимов В.А. Введение в механику горных пород. – М.: Недра, 1976. – 219 с.
24. Шашенко А.Н., Парчевский Л.Я., Турчанинов Г.А. Устойчивость капитальных выработок в условиях случайной неравномерной нагрузки. // Горное давление в капитальных и подготовительных выработках. – Новосибирск, 1983. – С. 43-45.
25. Парчевский Л.Я., Шашенко А.Н. Количественная оценка структурно-механического ослабления породного массива. // Изв. вузов. Горный журнал – 1987. – №11. – С. 38-44.
26. Зорин А.Н., Халимендик Ю.М., Колесников В.Г. Механика разрушения горного массива и использование его энергии при добыче полезных ископаемых. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2001. – 413 с.
27. Динник А.Н. Статьи по горному делу. – М.: Углетехиздат, 1957. – 224 с.
28. Подземные гидротехнические сооружения. / В.М. Мостков, В.А. Орлов, П.Д. Степанов и др. – М.: Высшая школа, 1986. – 464 с.
29. Заворицкий В.И. Проектирование подземных транспортных сооружений. – Киев: Будівельник, 1975. – 204 с.
30. Тоннели и метрополитены / В.Г. Храпов, Е.А. Демешко, С.Н. Наумов и др. – М.: Транспорт, 1989. – 383 с.