

Заслуги Е.И. Шемякина в государственной, общественной и научной деятельности получили высокую оценку в нашей стране и за ее пределами. Он является лауреатом Государственной премии (1984 г.), действительным членом Академии естественных наук Российской Федерации и Академии горных наук, почетным членом Международной инженерной академии.

Награжден правительственными наградами: орденами «Знак Почета» (1967), Трудового Красного Знамени (1975 г.), Дружбы народов (1981 г.), медалями, удостоен трех золотых медалей ВДНХ, награжден медалями ГДР (1978 г.), БНР (1981 г.), КНДР (1985 г.).

На протяжении ряда лет Е.И. Шемякин активно работает в коллективе ученых ИГД им. А.А. Скочинского, давая консультации по актуальным научно-техническим проблемам, проводя многочисленные научные семинары и конференции, приглашая участвовать с публикациями в журнале ФТПРПИ и др. Особенно активно Е.И. Шемякин работает в ННЦ ГП — ИГД им. А.А. Скочинского в последние годы, возглавляя важные фундаментальные исследования по направленному физико-химическому изменению свойств и состояния горного массива, а также по физическим основам процессов разрушения горных пород. Под его руководством и при активном содействии учеными ННЦ ГП — ИГД им. А.А. Скочинского подготовлено и защищено 7 докторских диссертаций. Полученные научные результаты широко используются в горной промышленности.

Ученые БНТУ, БГУ, БАТУ, БГТУ и ПО «Беларуськалий», ученики и друзья искренно поздравляют Евгения Ивановича с юбилеем, желают ему крепкого сибирского здоровья, долгих лет жизни, новых успехов в творчестве и подготовке специалистов высшей квалификации.

А.Б. Богатов, А.В. Чигарев, А.М. Журавков, Ю.В. Василевич.

ОЧЕРКИ ГЕОМЕХАНИКИ (ГОРНОЕ ДАВЛЕНИЕ И ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ГОРНЫХ ПОРОД)

Шемякин Е.И.

Развитие представления о горном давлении и об основах механики горных пород рассматривается в двух научных направлениях - развитие методов физического моделирования в шахтных и лабораторных условиях и теоретические исследования в теории упругости и пластичности с применением результатов, полученных при изучении горного массива.

В настоящее время ученые и инженеры при исследовании проблемы добычи полезных ископаемых и ее экономической эффективности сталкиваются с необходимостью решения задачи: как применить знание основных законов механики к освоению подземного пространства?

С точки зрения механики и ее основ - законов сохранения - добыча угля подземным или открытым способом (в больших объемах), добыча нефти и газа, строительство крупных объектов на земле и под землей - это все действия, связанные с законами сохранения масс, равновесия (или количества движения), сохранения энергии. Применение этих законов требует грамотного проектирования (учет основных внешних факторов, объективных условий), подготовки необходимых данных, проведения точных измерений параметров (изучение свойств окружающей среды - горного массива) и серьезных экономических оценок.

Конечно, огромный практический опыт в области горных работ существовал и без надлежащего обобщения (теории) и, казалось, не требовал какой-то науки. Это удивительно, но такие взаимоотношения теории и практики (без искренней взаимности) характерны для всех

времен и народов и, к сожалению, для всех правителей народов. Но реальная жизнь немыслима без обобщения опыта, создания теории (обобщенного знания) для сознательного и созидательного развития. Так, в практике горных работ и их планирования (проектирования) появились правила ведения этих работ, которые долгое время оставались в руках избранных- горное дело являлось искусством отдельных умельцев (которых осталось единицы и до наших дней; автору довелось иметь дело с такими замечательными людьми, но об этом - отдельный разговор). Время требовало, чтобы это знание стало достоянием многих и многих горных инженеров - так начала развиваться горная наука.

Изучая правила действия древних и средневековых горных практиков-умельцев, нельзя не вспомнить старославянские слова "уметь" и "ведать". "Уметь" - это искусство, а "ведать" - это знать, выучить, научиться. Поэтому очерки уместно начать с теоретической позиции - с обобщения знаний в математической форме, как бы это изложение ни отставало от исторической правды об умениях отдельных гениальных провидцев.

В нашем изложении это начало совпадает с временем первых публикаций проф. М.М. Протодяконова (старшего) [1]. Основной его опубликованный результат - об ограниченности нагрузки на крепь, несмотря на рост глубины выработки - был хорошо известен практикам, но единодушно отвергался первыми теоретиками: "Как же так? Глубина расположения выработки растет, а давление на ее крепь - нет". Такая позиция понятна сейчас, но общее мнение было воспитано на законе Паскаля для жидких сред, в которых действительно давление растет с глубиной - и это точный факт. М.М. Протодяконов первый обратил внимание на то, что горный массив, в отличие от мирового океана (для которого справедлив закон Паскаля), обладает свойствами сопротивления сдвигу (изменению формы), и это сопротивление "работает" в пользу горняков - не дает расти нагрузке на крепь.

На этом этапе обсуждения уместно начать разговор о месте математических моделей при исследовании физических процессов в природе и влиянии этих моделей (абстрактных, обобщенных описаний сложных процессов) на реальное развитие производства, производительных сил и общества в целом. Так знание и становится реальной силой, а носители знания - интеллигенция - реальными участниками процесса развития общества. М.М. Протодяконов понимал этот процесс очень хорошо, этим можно объяснить его энергию и настойчивость в пропаганде нового знания, ибо реализация его результатов сулила огромные материальные выгоды. По пониманию сущности процесса ближе всех к М.М. Протодяконову был Т. фон Карман, который в специальных, пионерских опытах оценил сопротивление реальных горных пород сдвигу в условиях, приближенных к глубоким выработкам, - эти опыты стали классическими. Много позже знаменитый Л. Мюллер, явившийся основателем европейской (венгерской) горной школы, также близко подошел к основному результату М.М. Протодяконова, но и он не смог его сформулировать.

Дальнейшее развитие представлений о горном давлении и основах механики горных пород шло в двух параллельных, поначалу слабо связанных между собой научных направлениях: первое - развитие экспериментальных (лабораторных и полевых, шахтных) исследований ВНИМИ в школе нашего знаменитого соотечественника Г.Н. Кузнецова [2,3] по следам М.М. Протодяконова и Т. фон Кармана, а второе (столь же оригинальное) - развитие математических методов в теории упругости (Н.И. Мухелишвили, С.Г. Михлин, С.Г. Лехницкий и др.) и в теории пластичности (С.А. Христианович, В.А. Соколовский и др.), имеется в виду применение этих методов в механике горных пород.

Остановимся на математических моделях, имея в виду их содержательность и краткость в описании. Выше было сказано, что М.М. Протодяконов отметил и подчеркнул решающую роль сопротивления среды сдвигу (упругость, вязкость, трение) в формировании основных нагрузок на крепь (горное давление), но уже требования теоретической сейсмологии раньше, чем другие разделы наук о Земле, продиктовали выбор упругой модели среды в качестве основной.

Опыт сейсмологических исследований и изучения структуры земной коры показал, что представление горного массива в качестве среды с упругим сопротивлением изменениям объема позволяет вполне удовлетворительно описывать многие наблюдаемые явления при распространении сейсмических колебаний.

Доказательства справедливости этой модели были обширны, так что на долгие годы математическая модель упругого горного массива стала убедительной (включая ограниченную определенными параметрами схему, предложенную А.Н. Динником). Это важно отметить, имея в виду многочисленные области применения модели упругого тела в горном деле и в инженерной геологии.

Обратимся к проблеме формирования и изменения полей напряжений и деформаций в окрестности подземной выработки, будь то подготовительная выработка, скважина или тоннель. С точки зрения упругой модели, учитывающей сопротивление сдвигу и изменению объема, эта ситуация наиболее изучена: нормальное к поверхности обнажения напряжение обращается в ноль (или приравнивается к величине отпора крепи), а вся нагрузка внешней среды приводит к росту кольцевых напряжений, охватывающих выработку. Эта картина напряженного состояния горной выработки принципиально отличается от таковой в жидкой среде.

По этой же причине (возникновение кольцевых напряжений) академик А.Н. Крылов одним из первых рассматривал задачу о концентрации напряжений в окрестности палубных вырезов под рудийные башни. Тем не менее основные задачи о горном давлении были еще впереди. По-видимому, первые постановки таких задач были предложены еще С.Г. Михлиным и С.А. Христиановичем, хотя совместные публикации [9,10] и последующее краткое обсуждение оставили некоторые вопросы о приоритетах. Важно для истории и для развития основных результатов то, что в начале этих идей были имена С.А. Христиановича и С.Г. Михлина. И это важно не для тех, кто пишет свою историю, а для тех, кто интересуется истиной. Кроме того, это актуально еще и потому, что рождение идей и разработка физико-математических моделей (как мы это сейчас видим в сжатом изложении математического описания) - это самое главное наследие ученого, его школы.

Вернемся к основной проблеме горного давления: расчету давления на крепь, если известны параметры выработки, свойства горных пород, окружающих ее, и скорость проходки выработки (скорость изменения напряженного состояния в окрестности выработки). Эта основная задача и была рассмотрена С.Г. Михлиным [10], как задача плоской теории упругости (по Г.В. Колосову и Н.И. Мусхелишвили). Это был, конечно, фундаментальный шаг в области теории прочности твердых тел и механике горных пород. Полемику, сопровождавшую эти работы, вряд ли можно признать конструктивной. Об этом трудно судить и сейчас. Но для нас важно отметить этот этап, потому что это было начало теоретических исследований горного давления, а также потому, что в эти же годы появились многочисленные сообщения об экспериментальных исследованиях и шахтных наблюдениях за проявлениями горного давления (Г.Н. Кузнецов в СССР, Л. Мюллер и О. Якоби в Западной Европе и др., довоенные публикации из Канады и Южной Африки неизвестны, хотя по масштабам горных работ можно догадываться, что работы по механике горных пород там уже велись).

С обсуждаемых позиций можно отметить, что теоретических работ по геомеханике до работ С.Г. Михлина, С.А. Христиановича, А.Н. Динника, Г.Н. Кузнецова и Г.Н. Савина не было.

Одной из главных проблем, которую привнесла с собой математическая модель явления, была концентрация напряжений и деформации в угловых точках выработки (прямоугольник или квадрат в рассматриваемой плоскости - С.Г. Михлин или Г.Н. Савин). Эта проблема почему-то стала главным препятствием на пути применения методов теории упругости в задачах горного дела. Понадобились большие усилия и годы напряженного труда для того, чтобы теоретики и практики нашли приемлемое решение и достигли взаимопонимания. Этот этап в развитии геомеханики связан с двумя работами С.А. Христиановича - о напряженно-деформированном состоянии угольного пласта в призабойной зоне и о гидравлическом разрыве нефтяного пласта [11]. Здесь

в первую очередь отразилась полемика с первыми (собственными, практически) результатами решений плоской задачи теории упругости, а самое главное - появились новые математические модели. Действительно, в первой задаче (о призабойной, зоне угольного пласта, в зоне отжима - в области интенсивного деформирования) условия равновесия достаточно было выполнить интегрально: по величине главного вектора в проекции на нормаль к границе с пластом. Это рациональное требование, включая определяемую из этого условия ширину зоны отжима, сняло вопросы, связанные с концентрацией напряжений на забое (границе угольного пласта и выработки). Конечно, вопрос о поведении материала в призабойной зоне при этом до конца не исследовался (в качестве первого приближения предлагалось применять известное решение Л. Прандтля, возможно применение решения А.А. Ильюшина о сжатии пластической полосы между жесткими плитами). Но главный шаг был сделан - теоретическое решение существенно приблизилось к описанию реального процесса. Во второй задаче (о гидравлическом разрыве нефтяного пласта) был сделан решающий шаг в понимании процесса разрушения горных пород в естественном залегании. Это сейчас, через 50 лет, появились представления о регулярных, измеряемых блочных структурах горного массива (М.А. Садовский, В.Н. Родионов и др.[6]), в котором нужно не столько создавать новые поверхности (разрушать горные породы), сколько обнажать подходящие границы блоков (С.А. Христианович [11]), а тогда нужна была изрядная интуиция для того, чтобы ввести гипотезу о плавном смыкании берегов трещины гидроразрыва. Это предположение "замкнуло" задачу и позволило определить все необходимые параметры. Прошло много лет, и сейчас видно, что эти результаты были необходимыми и естественными этапами развития механики горных пород.

К этим этапам надо отнести интенсивное развитие опытных работ в лабораторных и шахтных условиях (в СССР - ВНИМИ, ИГД им.А.А.Скочинского, ИГД Сибирского Отделения АН СССР, Кольский Центр АН СССР, горные институты Москвы, Ленинграда, а также на Урале, Украине, в Казахстане и в Киргизии) [5-8, 13]. Эти работы были хорошо организованы, материально поддержаны промышленностью и АН СССР, в них принимали активное участие многие известные специалисты (Г.А. Турчанинов, Ж.С. Ержанов, К.В. Руппенейт, Н.С. Булычев, В.С. Ямщиков, С.Е. Чирков, И.М. Петухов, Б.З. Амусин, И.Т. Айтматов, С.В. Кузнецов и многие другие). Для нашего обзора важно упомянуть первое издание по вопросам горного давления (начало регулярных выпусков, по-видимому, в 1959 г.) и первое международное издание - ФТПРПИ (с переводом в странах английского языка с 1965 г.). Надо подчеркнуть, что во главе этих изданий стоял известный горный специалист, тогда зам. председателя СО АН СССР чл.-корр. АН СССР Т.Ф. Горбачев. К этому же времени, но без взаимных контактов, относится создание Международного общества по механике скальных пород и издание международного журнала по геомеханике.

Так получилось, что до 1985 г. работы по механике горных пород в СССР стали сосредотачиваться в центре и в Сибири, так как уже проявлялись трудности в общении и проведении регулярных встреч специалистов и в рамках СССР, и особенно в рамках СЭВ, где работа по геомеханике, особенно в экспериментальном плане, шла в 70-е годы весьма эффективно: проводились ежегодные встречи по очереди в каждой из стран с проведением измерений в шахтных условиях, регулярными обсуждениями подготовленных к изготовлению и испытаниям новых приборов и методик.

Насколько сейчас известно, в других странах не было ни такого широкого уровня исследований, ни такого делового контакта в общении специалистов. Об этом можно судить и по публикациям в международной печати, и особенно при сравнении новизны и содержательности публикаций с отечественными, несмотря на большие трудности, искусственно созданные перед отечественными авторами в этой области науки (имеется в виду отсутствие ссылок на отечественные исследования). Попытки общения предпринимались и ранее, эти этапы кооперации специалистов по механике горных пород были организованы учеными Польши (А. Кидебински), которым многим обязана современная геомеханика. В послевоенные годы

значительный прогресс в геомеханике продемонстрировали ученые З. Бенявский, М. Саломон, Х. Вагнер, активно работавшие в рудной и угольной промышленности ЮАР, особенно интересны в связи с обсуждаемыми материалами результаты М. Саломона (1974 г.) по изучению эффектов разупрочнения горных пород при нагружении.

I. Для описания пространственного напряженно-деформированного состояния горного массива в окрестности горных выработок в работе [19] было предложено вводить новый "паспорт прочности" горных пород, который основан на рассмотрении различных возможных ситуаций, связанных с деформациями по площадкам скольжения.

В опубликованных работах Института горного дела СО АН СССР за последние годы подтверждаются факты в пользу этой позиции [14,15]. Во-первых, реально, как и в многочисленных опытах Надаи с металлами, обнаруживается проявление поверхностей скольжения в виде регулярной или правильной сетки поверхностей, на которых снижается прочность за счет сцепления (связности) и реализуется остаточная прочность за счет трения [14, 15]. Впервые при описании паспорта прочности эти картины поверхностного скольжения были приведены в работе [12]. Во-вторых, при проведении экспериментов обнаружено соответствие момента визуализации поверхностей (линий) скольжения моменту исчерпания прочности и перехода к ниспадающей ветви на диаграмме " $\tau-\gamma$ " (τ - касательные напряжения, γ - сдвиг), хотя реализация ниспадающей ветви существенно зависит от краевых условий задачи (рис.1). Не касаясь других существенных и интересных фактов, обнаруженных в тех же экспериментах, отметим, что они позволяют подтвердить паспорт прочности [12]. А именно, произвольное объемное (трехосное) напряженное состояние

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (1.1)$$

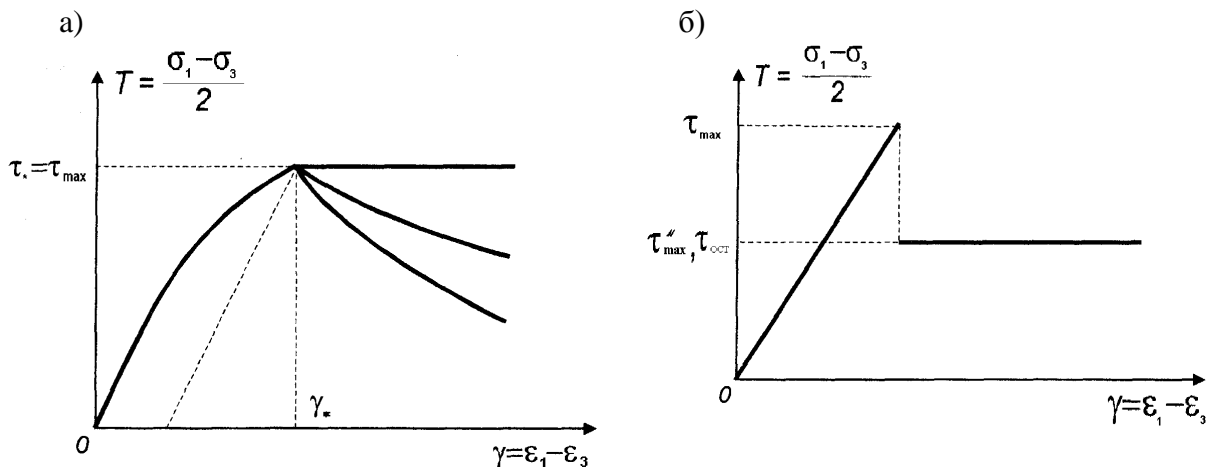


Рис. 1. Зависимость максимальных касательных напряжений от главных сдвигов с учетом ниспадающей ветви

можно получить наложением следующих трех напряженных состояний:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -T \end{pmatrix} + \sigma_n \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \sigma'_2 \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad (1.2)$$

$$\text{где } \sigma'_2 = \sigma_2 - \sigma_n = \sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}. \quad (1.3)$$

Первое состояние - проявление максимального касательного напряжения:

$$T = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (1.4)$$

Оно реализуется в чистом виде, например при сжатии по первому и растяжении по третьему главному направлению величиной T .

Второе - гидростатическое напряжение в точном смысле: по всем трем направлениям приложено равное давление:

$$\sigma_n = \frac{\sigma + \sigma_3}{2}.$$

Третье состояние дополняет два первых до произвольного и дает ответ на вопрос о влиянии σ_2 (среднего главного напряжения) на прочность материала, при этом существенно вводить не σ_2 , а σ'_2 .

Таким образом, можно сказать, что любой набор из трех параметров можно применять для описания трехосного напряженного состояния (1.1):

$$T, \sigma_n, \sigma'_2, \quad (1.5)$$

$$T, \sigma_n, \mu_\sigma = \frac{\sigma'_2}{T}, \quad (1.6)$$

$$\text{где } \mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad - \text{ параметр Лодэ-Надаи.} \quad (1.7)$$

Так что новый паспорт прочности может быть описан соотношением

$$T = f(\sigma_n, \sigma'_2) \text{ или } T = f(\sigma_n, \mu_\sigma), \quad (1.5)$$

где f – пока неизвестная функция.

Поскольку известно, что

$$\mu_\sigma = \frac{T_{23} - T_{12}}{T}, \quad (1.9)$$

$$\text{где } T_{23} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2}, \quad T_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (1.10)$$

- другие экстремальные площадки на диаграмме Мора, можно сказать, что введение параметра Лодэ в паспорт прочности и есть существенный элемент в описании произвольного трехосного напряженного состояния в отличие от многочисленных предложений по этому поводу (см., например, работы [3, 7, 8]).

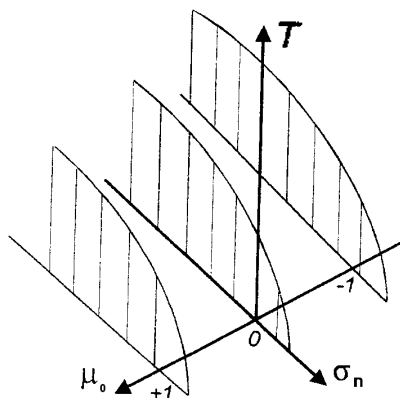


Рис. 2. Паспорт прочности в случае трехосного напряженного состояния

Если обратиться к традиционным методам построения кругов Мора и оценке паспорта прочности по огибающей, то из этого анализа следует, что необходимо учитывать и положение других кругов Мора, связанных с T_{23} и T_{12} и влияющих на оценку прочности горного массива или его различных частей, либо переход одного и того же объема из одного критического состояния в другое с полным исчерпанием прочности или "несущей" способности.

Построение паспорта прочности (см. формулу (1.8)) указано в работе [12] в виде предельной поверхности (рис. 2) и отвечает известным требованиям:

а) различие пределов прочности горных пород при одноосных испытаниях на сжатие $\sigma_{сж}$ и растяжение

$\sigma_{расп}$; для горных пород в отличие от других твердых тел $\sigma_{сж} \neq \sigma_{расп}$ и

$$\sigma_{сж} = (2 \div 20) \sigma_{расп} \quad (1.11)$$

б) с ростом нормальных на площадке напряжений σ_n предельное значение сопротивления сдвигу T увеличивается.. Это отражает проявление трения, которое либо препятствует разделению тела на части, либо характеризует дополнительную прочность;

в) при высоких и сверхвысоких значениях T стремится к предельному значению, которое, возможно, зависит от скорости нагружения [3, 6, 7].

С учетом основных требований (см. пп. а, в) для построения приближенного паспорта прочности вводят две численные характеристики условной прочности: угол внутреннего трения φ и сцепление C . При применении этого паспорта в задачах динамики необходимо также учитывать возможную предельную величину T . При этом в противоречие с формулой (1.8) не учитывается влияние среднего по величине главного напряжения σ_2 .

Сделаем два замечания по поводу построения нового паспорта прочности:

можно ввести, например, следуя Г.Н. Кузнецову, класс "хрупких" материалов, которые приходят в разрушенное состояние практически на пределе упругого деформирования. Если такой предел отмечен на диаграмме " $\tau-\gamma$ ", то величина σ_2 может и не влиять на построение паспорта прочности, хотя это не означает ее исчерпание по всем площадкам;

второе замечание связано с вопросом - достаточно ли для описания паспорта прочности указания на предельные соотношения между главными напряжениями (см. формулу (1.8)) или необходимо дополнить это описание указанием на величину деформаций, при которой несущая способность будет исчерпана. По-видимому, ответ однозначен: необходимо вводить дополнительную информацию о процессе деформирования [12, 13, 20]. Действительно, критические состояния по величине напряжений еще недостаточны для оценки несущей способности пласта, в том числе и вблизи забоя: напряжения практически не связаны однозначно с соответствующими деформациями. Кроме того, деформации (в том числе и остаточные, см. рис. 1, а) существенно зависят от истории нагружения или деформирования, как об этом говорит опыт [15,16]. При обычных испытаниях, когда нагружение ведется либо с помощью пропорционального изменения нагрузок, либо по заданной программе нагружения (а не деформирования), параметр, характеризующий разрушение, остается "скрытым". В целом предложение об учете в дополнение к паспорту прочности истории деформирования означает необходимость проведения специальных экспериментов, в которых задано (либо контролируется, измеряется) деформированное состояние; для последнего справедливы общие утверждения (см. формулу (1.8)), из которых следует необходимость учета и оценки вида деформированного состояния при разрушении.

II. Обратимся к обсуждению экспериментальных результатов М.М. Протодяконова и их современной интерпретации, основываясь на материалах статьи [14], в которой рассматривается задача о взаимодействии крепи горных выработок с массивом - основная задача механики горных пород. Это исследование приобретает особенно большое значение при освоении глубоких месторождений угля и руды (в сложных горно-геологических условиях), при проектировании и строительстве глубоких шахт и создании систем разработки полезных ископаемых на большой глубине.

При решении задач о взаимодействии крепи выработок с горным массивом необходимо знать не только основные деформационные характеристики горных пород вплоть до разрушения, но и исходное состояние горного массива, окружающего выработку. Таким образом, надо учитывать не только упругие свойства массива, что подсказала сейсмологическая практика, но также сцепление и трение. Это связано с тем, что при увеличении нагрузок паспорт прочности указывает (Т. Карман, Г.Н. Кузнецов и др.) на возрастающее влияние трения при сдвигении горных пород и на уменьшающееся влияние сцепления. Принято считать, что если величину

последнего оценивать некоторым параметром C и сравнивать с γH - характеристикой напряженного состояния нетронутого массива, то область сравнительно небольших нагрузок будет определяться безразмерным параметром $\frac{C}{\gamma H} > 1$, а больших нагрузок (в частности, для больших глубин разработки) - условием $\frac{C}{\gamma H} < 1$.

В пределах первой области ($C > \gamma H$), что отвечает либо небольшим глубинам разработки, либо прочным породам массива, было возможно применять представление о малых деформациях массива при расчетах крепи. При этом оценка прочности была связана с величиной сцепления. Так развиваются расчетные схемы, основанные на типичных моделях механики сплошной среды с учетом малых необратимых деформаций.

В пределах второй области, которая включает в себя либо большие нагрузки, либо сравнительно непрочные области массива, следует применять иные представления. В этих случаях прочность горного массива определяется его блочной структурой, взаимным перемещением блоков с трением по поверхностям скольжения. Эти перемещения наблюдаются при внешних смещениях горных пород в окрестности выработок, вблизи обнаженных поверхностей, за счет податливости крепи или ее передвижки.

Имеет место и переходная область, в которой необходимо учитывать и трение, и сцепление. При малых перемещениях проявляется деформационная способность до исчерпания сцепления, а при развитых перемещениях дополнительная прочность определяется трением по возникающим поверхностям скольжения.

При решении задачи о взаимодействии крепи выработок с горным массивом необходимо знать не только основные деформационные характеристики горных пород вплоть до разрушения, но и исходное (или окружающее выработку) напряженное состояние горного массива.

Поясним основные представления на примере горизонтальной одиночной протяженной выработки в горном массиве, используя результаты работ [1, 12, 14, 15]. При $C/\gamma H \geq 1$ распределение напряжений характеризуется концентрацией кольцевых напряжений в непосредственной окрестности выработки, при этом знак равенства в критерии отвечает возникновению зоны необратимых деформаций, которая с увеличением глубины выработки (или с уменьшением C) охватывает ее окрестность (рис. 3).

При $C/\gamma H < 1$ начинают проявляться поверхности скольжения, отражающие необратимые деформации массива и возможное "разрушение" (разделение массива на блоки по подходящим ослабленным поверхностям [12, 14]).

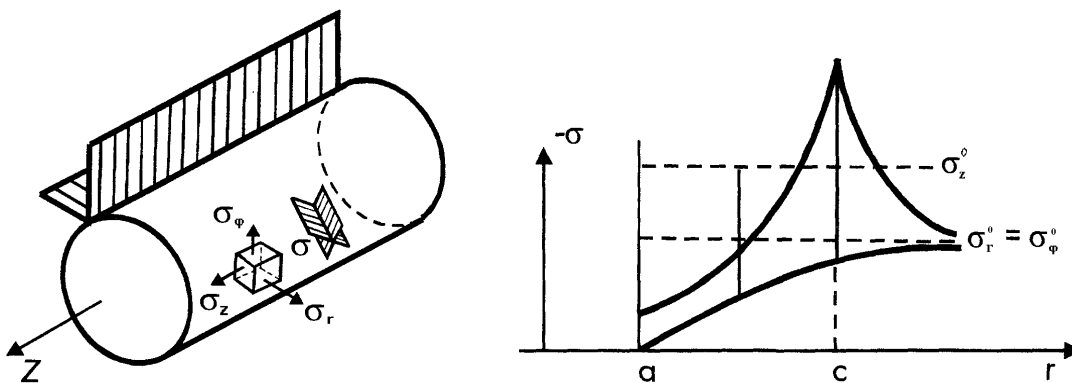


Рис. 3. Картина площадок скольжения в зонах ослабления круговой горизонтальной выработки

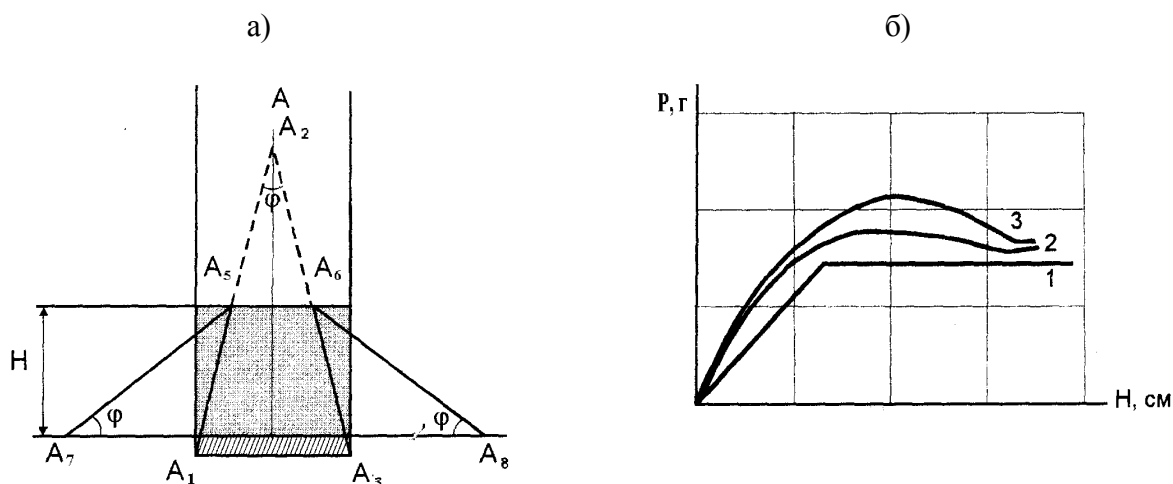


Рис. 4. Картина деформирования, поясняющая расчет предельных нагрузок на крепь, включая опытные данные: 1 - расчет по данным работы [1], 2 - экспериментальные данные, 3 - расчет по данным работы [14]

Так, на рис. 4, а показано взаимное расположение таких зон и указаны две поверхности скольжения A_1A_5 и A_3A_6 в зоне, где "прочность" массива определяется в основном трением по этим поверхностям; на участках A_2A_5 и A_2A_6 поверхностей скольжения прочность определяется не только трением, но и сцеплением. Развитие поверхностей скольжения в горном массиве хорошо прослеживается на модели с эквивалентными материалами малой связности. При этом основным фактором, формирующим эти поверхности, является напряженное состояние вблизи свободной (или подкрепленной, но податливой) поверхности выработки. Конечно, в зависимости от формы выработки и вида напряженного состояния массива [12] характер расположения поверхностей скольжения может изменяться, но само их существование не вызывает сомнений и должно учитываться при расчете нагрузок на стационарные или подвижные крепи.

Эти представления, как и основанные на них методы расчета, существенно отличаются от таковых, основанных на представлении о сводообразовании, хотя из рис. 4 видно, что образование "сводов" наблюдается в переходном диапазоне и тем самым скрывает внутреннюю картину деформирования, связанную скорее с образованием острых куполов.

Для того, чтобы пояснить принципиальное различие этих представлений, обратимся к опытным данным М.М. Протодьяконова, которые послужили основой теории сводообразования, и попробуем объяснить экспериментальный факт, который наблюдался впервые этим замечательным ученым [1], но, к сожалению, не получил разъяснения.

В опытах [1] для моделирования использовался материал со сцеплением - влажный песок, который засыпался в сосуд с подвижным основанием. Перемещение последнего имитировало податливость стенки выработки и указывало на образование области в виде свода, ограниченного "параболической кривой" в плане. Этот факт и был положен в основу теории сводообразования как отправной пункт. Однако этому опыту можно дать другую интерпретацию с наших позиций: после подвижки основания в материале развиваются две крайние линии скольжения (в плоскости чертежа), которые вместе с их продолжением образуют треугольную область $A_1A_2A_3$ (см. рис. 4, а).

Вследствие совместного влияния сцепления и трения на определенных участках выше точек A_5 и A_6 линии скольжения полностью не развиваются (и не видны) и область, явно выделенная после подвижки основания, имеет вид, близкий к "своду" $A_1A_5A_6A_3$. Если проводить опыты с материалами, сцепление которых изменяется (уменьшается) плавно, то

можно увидеть постепенное вырождение области $A_5A_2A_6$ и переход от "свода" к "куполу" – к области $A_1A_2A_3$.

Таким образом, опыты показывают, что при подвижке стенки (крепя или ее части) выработки массив в ее окрестности разбивается на области двух типов: область $A_1A_2A_3$, непосредственно связанную с подвижкой границы, и остальную, неподвижную (в смысле больших относительных перемещений) область.

Опираясь на этот основной факт и предполагая правдоподобные гипотезы относительно напряжений на границах подвижной области - блока, можно построить схемы расчета давления на крепь.

Рассмотрим один из возможных вариантов, имея в виду в первую очередь опыты М.М. Протодьяконова [1]. Пусть H - высота засыпки в сосуд с подвижным дном шириной m (рассматривается плоская картина - плоская деформация на модели) - см. рис. 4, а. Вес блока $A_1A_5A_6A_3$ определяется по формуле

$$Q = \gamma H \left(m - H \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \quad (2.1)$$

где γ - удельный вес материала, φ - угол внутреннего трения (угол естественного откоса).

Если бы напряжения на A_1A_5 и A_6A_3 были равны нулю, то материал растекался бы из блока и расположился под углом естественного откоса (см. трапецию $A_7A_5A_6A_8$ с углами наклона боковых сторон, равными φ). Примем, что в этой условной насыпи $A_7A_5A_6A_8$ напряжения, действующие на площадку A_1A_5 (или A_6A_3), горизонтальны и равны $\xi \gamma h$ (где h - расстояние по вертикали от соответствующего участка площадки на A_1A_5 до свободной поверхности насыпи A_7A_8 ; ξ - коэффициент бокового распора).

Сила, действующая на A_1A_5 (или A_6A_3), равна

$$R = \frac{\xi \gamma H^2}{2 \cos \frac{\varphi}{2}} \left(1 - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right). \quad (2.2)$$

После подвижки основания на участке A_1A_3 площадка A_1A_5 становится площадкой скольжения, на которой действует нормальное к ней усилие:

$$N = \frac{\xi \gamma H^2}{2} \left(1 - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2.3)$$

и развивается касательное усилие (которое определяется нормальным усилием):

$$T = \frac{\xi \gamma H^2}{2} \operatorname{tg} \varphi \left(1 - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2.4)$$

Из условия равновесия всех сил, действующих на блок $A_1A_5A_6A_3$ в проекции на вертикальную ось, давление на подвижное основание A_1A_3 определяется по формуле

$$P(H) = \gamma H \left[\left(2 - H \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) - \xi H \cos \frac{\varphi}{2} \operatorname{tg} \varphi \left(1 - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \right], \quad (2.5)$$

или в безразмерных переменных (силы отнесены к $\gamma \frac{m^2}{4}$, длина $\frac{m}{2}$):

$$P(H) = H \left[2 - H \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} - \xi H \cos \frac{\varphi}{2} \operatorname{tg} \varphi \left(1 - \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \right) \right], \quad (2.6)$$

где безразмерная высота H ограничена неравенством

$$0 \leq H \leq H_{\max} = ctg \frac{\varphi}{2}$$

Из рассматриваемой схемы следует, что при $H > H_{\max}$ сила давления на A_1A_3 , не зависит от высоты засыпки и равна

$$P(H_{\max}) = ctg \frac{\varphi}{2} \left(2 - actg \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2.7)$$

$$a = tg \frac{\varphi}{2} + \xi \cos \frac{\varphi}{2} tg \varphi \left(1 - tg \varphi tg \frac{\varphi}{2} \right), \quad (2.8)$$

Формулы (2.6) и (2.7) показывают, что при увеличении H от нуля до $H^* = 1/a$ давление на подвижное основание монотонно увеличивается от нуля до $P^* = 1/a$, а затем - при изменении H от H^* до H_{\max} - монотонно убывает от P^* до $P(H_{\max})$ и стабилизируется на этой величине.

Этот парадоксальный, на первый взгляд, результат был впервые экспериментально обнаружен М.М. Протодьяконовым, но объяснений с позиций сводообразования получено не было. Недавно в опытах И. Аткинсона [21] было обнаружено, что устойчивость модельной выработки (тоннеля) теряется при уменьшении высоты до некоторой критической (автору, по-видимому, неизвестны опыты М.М. Протодьяконова).

С методической точки зрения результаты этих опытов важны тем, что они могут быть объяснены с позиций, изложенных выше и основанных на представлениях о поверхностях скольжения в окрестности выработки. Это позволяет сделать заключение о том, что механизм площадок скольжения реально существует и что подобные расчетные схемы могут быть полезны при оценке нагрузок на податливые крепи горных выработок [21].

Если учесть, что коэффициент μ и значение угла φ изменяются для типичных обрушенных горных пород или закладочных (сыпучих) материалов в узких диапазонах, то безразмерные величины H_{\max} и $P(H_{\max})$ являются довольно устойчивыми характеристиками горного процесса. Так, в условиях, указанных на рис. 4,а, максимальная высота вывала может быть оценена величиной, равной примерно двум диаметрам выработки. Из данных рис. 4,а также следует, что представление о сводообразовании отражало, по-видимому, тот факт, что линии (поверхности) скольжения A_1A_5 и A_5A_2 частично проявились за счет зоны разрушения в окрестности выработки, а частично не проявились - это наблюдается вне зоны разрушения, где деформация меньше, а сцепление за счет связности не нарушено.

Остановимся на возможных уточнениях расчетной схемы в случае пространственной ситуации, когда напряженное состояние характеризуется тремя главными напряжениями (см. формулу (1.1)).

Основные площадки скольжения, определяющие необратимое деформирование с учетом нормальных напряжений на площадках (трение) и влияния времени (ползучесть и релаксация в горных породах), могут быть выбраны в соответствии с параметром Лодэ-Надаи (1.9):

$$\mu_{\sigma} = \frac{\sigma_2 - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}}{T}$$

Параметр μ_{σ} следует учитывать не только при оценке исходного напряженного состояния [21], но и при классификации основных элементов систем разработки и их пространственных сочетаний (расположение капитальных и подготовительных выработок, камер, направление фронта очистных работ, ведение закладочных работ).

Пространственный паспорт прочности (см. рис. 2) еще недостаточен для анализа устойчивости горных процессов: отмечалась необходимость учета "скрытых" деформационных

свойств горного массива. Такими свойствами являются, по нашему мнению, способность материала необратимо деформироваться в соответствии с механизмом площадок скольжения, его блочная (естественная и индуцированная) структура, разупрочнение и остаточная прочность.

Приведенный анализ возникающих зон ослабления удовлетворительно подтверждается в экспериментах, что позволило предложить некоторые простые схемы нагрузок на крепи подготовительных и капитальных выработок с учетом "разрушения" материала. По сути, эти схемы оказываются близкими к известным схемам М.М. Протодьяконова и К. Терцаги с естественными и очевидными поправками (см. рис. 4,а). При этом в основу расчета зон необратимых деформаций и "разрушения" положены диаграммы типа "τ – γ" (см. рис. 1, а) с учетом пространственной картины напряжений. На рис. 4, а указаны качественно различные зоны деформирования в окрестности выработки и две поверхности (линии) скольжения A_1A_2 и A_2A_3 выделяющие объем породы в зонах необратимых деформаций и разрушения, при этом вся картина представляет сечение, перпендикулярное оси выработки. Нетрудно видеть, что предельная нагрузка на крепь определяется площадью (объемом), выделенной этими линиями (поверхностями) скольжения, т.е. приближенно:

$$P_{кр} = \frac{d^2 \gamma}{4 \operatorname{tg} \varphi} \quad (2.9)$$

или в безразмерных величинах:
$$\frac{P_{кр}}{\gamma H} = \frac{d^2}{4 H \operatorname{tg} \varphi} \quad (2.10)$$

где d – характерный размер поперечного сечения выработки; H – глубина; φ – приближенно угол внутреннего трения. (Существенно подчеркнуть, что угол, определяющий наклон поверхности в каждой ее точке, рассчитывается с поправкой на дилатансию; приближенно этот угол можно принять равным углу внутреннего трения).

Вообще говоря, нагрузка может быть меньше предельной за счет того, что на участках A_3A_5 и A_4A_5 линий скольжения, расположенных вне зоны "разрушения", действует сцепление, а не только трение. В этом случае зоны вывала можно представить в виде свода и таким образом определить (уменьшить) нагрузку на крепь.

Аналогичные результаты, полученные К. Терцаги (без учета пространственного напряженного состояния), были приведены в работе [22] со ссылкой на неопубликованные работы Эри (см. ссылки в [22] на тезисы докторской диссертации, частное сообщение и технический отчет); надо заметить, что в работе [22] угол трения незаконно связан с термином "фактор трехосного (!) напряженного состояния", что не позволило выполнить анализ пространственной ситуации.

В заключение остановимся на выводах.

1. Анализ пространственной ситуации по напряжениям позволяет сделать вывод о возникновении различных зон ослабления в окрестности горных выработок, если судить по видам площадок скольжения. Это имеет практическое значение для расчета нагрузок на крепи на основе экспериментальных данных о конвергенции крепи и об исходном напряженном состоянии.

2. Поскольку никакая реальная крепь не может оказать сопротивления развитию упругих деформаций, она должна выдерживать без разрушения такие перемещения, которые указаны на основе расчета или эксперимента до начала "разрушения". "Жесткая" крепь, т.е. крепь, не обладающая необходимой податливостью, будет разрушена; началом деформаций "разрушения" (без видимых вывалов) в эксперименте служит достаточно заметны излом кривой "перемещение - время".

3. Для расчета нагрузок на крепь необходимо оценить радиус "зоны разрушения" или воспользоваться формулой (2.10) для определения предельных нагрузок, при этом учет радиуса зоны разрушения обычно служит для поправки к предельной нагрузке в меньшую

сторону. Важно отметить, что расчет перемещений крепи и нагрузок на нее основывается на разных вводных величинах.

III. В исследованиях по механике горных пород основное внимание уделяется экспериментальным методам наблюдения за перемещениями в горном массиве в окрестности выработок и оценкам возникающих напряжений, которые изменяются при проведении горных работ от исходного состояния до критических значений. Эти исследования ведутся механиками, геофизиками и горными инженерами как с практической целью освоения больших глубин (т.е. при освоении глубоких месторождений угля и руды, проектировании и строительстве глубоких подземных сооружений), так и с целью изучения напряженного состояния земной коры. Развитие инструментальных методов требует основательного проникновения физических знаний в горные науки. Это связано с анализом физических процессов, происходящих в горных породах при деформировании и разрушении, с разработкой приборов и средств автоматизации.

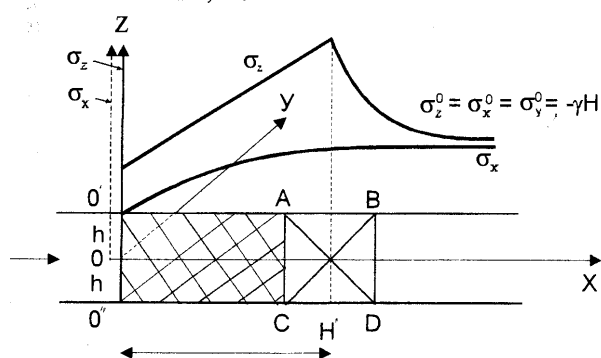


Рис. 5. Распределение напряжений в призабойной зоне горизонтального пласта (с картиной площадок скольжения)

Рассмотрим сначала простую ситуацию в окрестности забоя при подземной разработке пологого угольного пласта. Пусть в исходном состоянии напряженное состояние описывается гидростатическим (простейший вариант):

$$-q = \gamma H = \sigma_x^0 = \sigma_y^0 = \sigma_z^0 \quad (3.1)$$

(обозначения координат и площадок, на которых действуют главные напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, указаны на рис. 5).

Развитие очистных работ указано стрелкой и происходит в условиях плоской деформации ($\epsilon_y = 0$). Если рассмотреть элементарный объем ABCD в глубине пласта, то он находится в состоянии всестороннего сжатия с деформациями

$$\epsilon_x^0 = \epsilon_z^0; \epsilon_y^0 = 0,$$

затем при развитии очистных работ попадает в зону опорного давления (σ_z в несколько раз превосходит σ_z^0 , а σ_x уменьшается по сравнению с σ_x^0 вплоть до нуля на забое). При этом σ_y может и не изменяться. Такая картина распределения напряжений в рассматриваемом примере является общепринятой в настоящее время, подтверждается в опытах, что касается величин σ_x, σ_z , но σ_y измеряется редко.

Рассматриваемый объем претерпевает следующее деформирование при движении забоя - при переходе из нетронутой части пласта через зону опорного давления к поверхности забоя. Сначала развивается напряженное состояние:

$$\sigma_z > \sigma_y > \sigma_x, \quad (3.2)$$

в котором максимальные касательные напряжения и главные сдвиги ориентированы по площадкам скольжения:

$$\frac{\sigma_x - \sigma_z}{2} = \tau'_{\max}, \quad (3.3)$$

проходящим, как известно, через ось OZ и образующим углы $\pm \pi/4$ с этой осью (см. рис. 5).

При этом растет деформация сжатия ε_z , а деформация $\varepsilon_x = -\varepsilon_y$. В средней части пласта касательные напряжения τ_{xz} практически отсутствуют и реализуется напряженно-деформированное состояние с указанными главными напряжениями и деформациями.

Как принято в теории прочности твердых тел, сжимающие напряжения считаются отрицательными, все критические значения параметров положительными.

Приближение забоя к рассматриваемому элементарному объему приводит к иному напряженному состоянию:

$$\sigma_x > \sigma_z > \sigma_y, \quad (3.4)$$

что характерно для больших глубин разработки ($q > \tau'_{\max}$). Это изменение означает, что максимальные касательные напряжения теперь действуют на других площадках:

$$\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} = \tau'_{\max}, \quad (3.4)$$

проходящих через ось и образующих с нею углы $\pm \pi/4$ (см. рис. 5). Возникновение новой системы площадок скольжения, характерное для больших глубин, означает, что происходит дальнейшее ослабление (разупрочнение) пласта, сопровождающееся дальнейшим ростом деформаций ε_x . При этом развитие сдвигов по первой системе площадок при практически постоянном значении τ'_{\max} либо даже при его уменьшении (за счет ниспадающей ветви на диаграмме “ $\tau - \gamma$ ” (см. рис. 1, а)) можно принять как $\tau'_{\max} = \tau''_{\max}$.

Это изменение состояния на основе диаграммы “ $\tau - \gamma$ ” можно описать следующим образом. Изменение нормальных напряжений от гидростатических к состоянию $\sigma_z \geq \sigma_y \geq \sigma_x$ приводит к появлению наибольших касательных напряжений τ_1 и нормальных σ_{n_1} :

$$\tau_1 = \frac{\sigma_z - \sigma_x}{2}; \quad \sigma_{n_1} = \frac{\sigma_z + \sigma_x}{2}, \quad (3.5)$$

действующих на площадках, проходящих через ось OY и разделяющих пополам угол между осями OZ и OX, т.е. по диагоналям квадратного элемента ABCD.

На других площадках с экстремальными касательными напряжениями (см. формулу (1.10):

$$\tau_2 = \frac{\sigma_z - \sigma_y}{2}; \quad \tau_3 = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2}, \quad (3.6)$$

действуют свои нормальные напряжения:

$$\sigma_{n_2} = \frac{\sigma_z + \sigma_y}{2}, \quad \sigma_{n_3} = \frac{\sigma_y + \sigma_x}{2} \quad (3.7)$$

При возникновении касательных напряжений начинают развиваться деформации сдвига, которых не было в элементе ABCD (см. рис. 5) в исходном состоянии (см. формулу (3.1)) и которые являются наибольшими на площадках, где действует касательное напряжение (см. формулу (3.4)): элемент сжимается по оси OZ и выдавливается по оси OX в отрицательном

направлении. Эти деформации и соответствующие им касательные напряжения являются причиной необратимости состояния и перехода к закритическому, описывающему послепиковое поведение материала (см. рис. 1, а).

При достижении касательным напряжением τ_1 , величины τ_* , опорное давление будет равно

$$\sigma_z^* = 2\tau_* + \sigma_x^*, \quad (3.8)$$

и поскольку σ_x^* затем убывает, но сохраняет еще отличные от нуля сжимающие значения, опорное давление может существенно отличаться от $2\tau_*$ даже в условиях плоской деформации.

Растягивающие деформации по оси ОХ (при перемещениях в отрицательном направлении оси Х-в) могут происходить и при сжимающих напряжениях σ_x .

Заметим, что эти рассуждения о действии касательных напряжений и деформациях сдвига тем точнее, чем тоньше пласт ($h \ll H$), при этом граничные условия между пластом и окружающей средой играют все меньшую роль в силу симметрии задачи: в срединном сечении пласта касательные напряжения равны нулю, а, значит, направления ОZ и ОХ являются главными.

Что касается значений сдвиговых деформаций, то следует подчеркнуть: если деформации ε_z действительно остаются на уровне упругих, то деформации ε_x могут быть значительными; во всяком случае их развитием можно объяснить рост деформации сдвига:

$$\gamma_1 = \varepsilon_z - \varepsilon_x. \quad (3.9)$$

а значит, и переход в закритическое состояние; при вычислении γ_1 , следует учитывать, что ε_z и ε_x имеют разные знаки, что и делает γ_1 наибольшим значением из трех главных сдвигов.

Таким образом, при продвижении забоя в рассматриваемом элементе ABCD происходит монотонное изменение напряжений и деформаций от исходного (гидростатического в этом примере) состояния до напряжений и деформаций, отвечающих опорному давлению (см. рис. 5). В этом состоянии опорное давление отвечает максимальному значению τ_* , на основной диаграмме “ $\tau - \gamma$ ” (см. рис.1, а), описывающей состояние и поведение материала. Напряжение σ_x уменьшается, а деформация ε_x (растяжение) увеличивается за счет возможности расширения элемента ABCD в сторону забоя; величина σ_y может остаться неизменной, а соответствующая деформация $\varepsilon_y = 0$.

Увеличение касательных напряжений от нуля до τ_* и соответствующих сдвигов определяет основное значение главных площадок скольжения, которые проходят через второе главное направление (ось ОУ) и разделяют пополам углы между осями ОХ и ОZ, другие площадки с экстремальными значениями τ_2 и τ_3 играют второстепенную роль, так как ни τ_2 , ни τ_3 не достигают предельного значения τ_* .

С точки зрения интерпретации величины τ_* как переходной от деформирования сплошной среды к ее "разрушению" (или "предразрушению") при $\gamma = \gamma_*$, проявление опорного давления также отвечает моменту появления площадок скольжения, развитие сдвигов на которых определяет основные особенности закритического или "запредельного" состояния или, что то же самое,

последипикового поведения материала. Последний при $\gamma \approx \gamma_*$ разделяется сеткой линий скольжения на блоки или полосы поверхностями ослабления (площадками скольжения). Напомним, что именно размеры блока по сравнению с мощностью пласта и определяют быстроту уменьшения τ на диаграмме в последипиковой части: большее число блоков (меньший их размер) при той же мощности пласта означает большее число поверхностей скольжения, а значит, большую величину суммарного проскальзывания [12]. Не останавливаясь на этом детально, отметим, что в эту оценку входит и величина остаточной прочности $\tau_{ост}$ [14] (см. рис.1,б).

Анализ напряжений и деформаций в призабойной области пласта на основе деформационных представлений показывает, что эту область от забоя до опорного давления можно рассматривать как область "предразрушения": при достижении опорного давления в сечении $x = H'$ материал переходит в запредельное состояние с неопределенной "зависимостью" напряжений от деформаций, законы равновесия и сплошности деформации выполнены.

Математическая модель в области необратимых деформаций известна:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0; \quad (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 4\tau_{xz}^2 = 4\tau_{ост}^2 \quad (3.10)$$

В этой области целесообразно вместо сложной модели выбрать наиболее простую, адекватную состоянию материала, при этом скачок от τ_* до $\tau_{ост}$ следует понимать в смысле "зуба текучести", что, естественно, приводит к проскальзыванию по площадкам скольжения [14].

Описание деформаций (с учетом несжимаемости) следует дать как и при постановке задачи о разрушении: при сохранении

$$(\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2 + 4\gamma_{xz}^2 = 4\gamma_*^2 \quad (3.11)$$

следует ввести условие совместности в виде двух уравнений первого порядка [20].

Для описания напряженного состояния в призабойной зоне широко используется решение Прандтля для полуполосы: $|z| \leq h$, с "отпором" величины p :

$$\begin{aligned} \sigma_x - p &= -k\hat{x} + 2k\sqrt{1 - \hat{z}^2}; \\ \sigma_y - p &= -k\hat{x}; \\ \tau_{xz} &= k\hat{z} \end{aligned} \quad (3.12)$$

где k - постоянная величина τ_* или $\tau_{ост}$ (при ниспадающей ветви до остаточной прочности); величины \hat{x} и \hat{z} , - безразмерные переменные:

$$\hat{x} = \frac{x}{h}; \quad \hat{z} = \frac{z}{h}, \quad (3.13)$$

h - половина мощности пласта.

Рассмотрим прежде простейшую модель тонкого пласта в последипиковом состоянии, когда на диагоналях» элемента ABCD действует $\tau_{ост} < \tau_*$. На поверхностях пласта (границы с вмещающими породами) касательные напряжения могут быть пренебрежимо малы по сравнению с σ_z^* , а на срединной поверхности пласта равны нулю (по симметрии). Несущая способность пласта обеспечивается за счет σ_z^* (см. формулу (1.8)) даже при стремлении σ_x к нулю (за счет $\tau_{ост} \neq 0$).

Можно представить тонкий слой забоя ("непосредственный" забой), в котором напряжения σ_x изменяются от σ_x^* до нуля. Воз можно, что этот слой отвечает зоне дробления - зоне "лицевого" откола.

Это решение удовлетворительно с точки зрения описания изменения давления на пласт - постепенное увеличение от сечения на забое до сечения опорного давления, но в срединном сечении пласта неудовлетворительно описывает второе нормальное напряжение, которое равно $\sigma_x = p + 2k$, и отлично от нуля в сечении забоя. Но для тонкого пласта ($h \ll H$) важны условия на его границах: $z = \pm h$. Так, из уравнения (3.12) для $\hat{z} = \pm 1$ следует, что

$$\sigma_x - p = -k\hat{x}; \quad \sigma_z - p = -k\hat{x}; \quad \tau_{xz} = \pm k\hat{x}, \quad (3.14)$$

т.е. границы пласта $\hat{z} = \pm 1$ являются площадками скольжения, при этом в пределах тонкого пласта главные направления напряженного состояния поворачиваются на $\pm \pi/4$ от плоскости симметрии (где они совпадают с направлениями осей OX и OZ) при переходе к граничным точкам (в качестве таких линий скольжения могут выступить огибающие линии скольжения, проходящие по наиболее слабым пачкам угольного пласта[20]).

Таким образом, неудовлетворительность решения Прандтля можно интерпретировать как приближенное выполнение граничных условий. Во всяком случае, на границах пласта они выполнены точно.

Оставляя пока в стороне особенности поведения максимальных касательных напряжений - в смысле достаточно резкого поворота площадок скольжения (вместе с главными направлениями напряженного состояния), обратимся к наиболее интересным проявлениям деформированного состояния в призабойной зоне.

О деформациях и перемещениях в призабойной зоне пласта можно судить по зоне отжима и площадкам скольжения, подготовленным в сечении опорного давления. Так, на срединной поверхности пласта деформации сдвига:

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} = 0 \quad (3.15)$$

и в силу симметрии деформации

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad \text{и} \quad \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

являются главными. Очевидно, в рассматриваемой плоскости ($z = 0$) главный сдвиг практически равен

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = 2\gamma_* = \text{const}. \quad (3.16)$$

В рассматриваемой модели $\gamma_* = \text{const}$ и перемещение $U(x, z)$ накапливается в зоне отжима за счет перехода от сечения опорного давления к сечению на забое:

$$U = 2\gamma_* x + C.$$

О выборе константы можно сказать следующее. Условно можно считать, что в сечении опорного давления перемещение и равно нулю, значит

$$U = 2\gamma_*(x - H'),$$

$$\text{тогда} \quad U|_{x=0} = -2\gamma_* H'. \quad (3.17)$$

Для известного H необходимо сравнить наблюдаемые перемещения и размер зоны отжима. Но если учесть вклад деформации ε_z в сечении опорного давления и условия нестесненной деформации (деформации могут развиваться за счет перемещений в сторону отрицательного направления оси X-в), то условие (3.17) является приближенным.

Главное, что перемещения определены по формуле (3.17) в срединном сечении (по геометрии) и по слабой пачке (по механическим свойствам). За счет роста деформаций сдвига от нуля при $z = 0$ до $\gamma = \gamma_*$ «на линиях скольжения или огибающих линиях скольжения перемещение может быть только меньше. При равномерном по сечению отжиге это справедливо для всего пласта и позволяет оценить перемещение $U|_{x=0}$ на забое. Это очень важное обстоятельство. Рассмотрим подробнее возможные изменения перемещений. Если

$$\tau_{ост.} \ll \tau_*, \quad (3.18)$$

то по всей толщине пласта перемещение ближе к равномерному: по мере продвижения забоя поворот главных направлений напряженного состояния не очень существенен, линии скольжения (как следы площадок скольжения в плоскости XOZ) образуют ортогональную сетку - площадки максимального касательного напряжения, возникшие на пиковом (опорном) напряжении $\sigma_z \sim 2\tau_*$ образуют углы $\pm \pi/4$ с осями OX и OZ. Это обстоятельство, как было отмечено, практически важно, так как указывает на поверхности реального ослабления, которое можно усилить физико-химической обработкой.

Если $\tau_{ост.} \leq \tau_*$, то ситуация является более сложной, так как по мере продвижения забоя происходит существенный поворот главных направлений напряженного состояния, а значит, и возможный поворот площадок скольжения, на которых проявляется максимальное касательное напряжение $\tau_{ост.}$. Это означает, что работа сил горного давления затрачивается на более интенсивную подготовку материала пласта к разрушению. При этом имеет место неравномерный отжим: наибольший отжим в соответствии с формулой (3.17) происходит в срединном сечении или по слабой пачке вблизи плоскости симметрии пласта, а наименьший - на поверхностях с $\tau_{ост}$ вблизи (или на контактах) с вмещающими породами.

Наконец, обсудим следствия, связанные с изменением объема в призабойной зоне, трактуя ее как зону "предразрушения". При этом будем рассматривать три причины возможного изменения объема материала в призабойной зоне. В самом сечении опорного давления ($x = H'$) все напряжения являются сжимающими, а деформации - малыми деформациями сжатия, при этом $\varepsilon_y = 0$ при сжимающем напряжении σ_y . По мере продвижения забоя, как было отмечено в п.1, деформация ε_z остается сжимающей, а деформация ε_x (за счет отжима) может стать растягивающей при сжимающем напряжении σ_x . Заранее (до расчетов или измерения) нельзя утверждать, но можно считать, что в этих условиях изменение объема самих элементов материала происходит практически упруго (напомним, что при решении упруго-пластических задач - это наиболее часто используемое допущение), что часто позволяет считать материал несжимаемым, тогда

$$\varepsilon_x^0 + \varepsilon_z^0 = 0; \quad \varepsilon_x^0 = -\varepsilon_z^0 \quad (3.19)$$

Здесь величины с индексом 0 отнесены к изменениям деформаций за счет изменения объема самого материала в условиях всестороннего сжатия.

Вторая причина изменения наблюдаемого объема в призабойной зоне связана с дилатансией материала: изменением объема элемента за счет сдвиговых деформаций:

$$\varepsilon_x^{(1)} + \varepsilon_z^{(1)} = B[\varepsilon_x^{(1)} - \varepsilon_z^{(1)}].$$

Здесь для оценки изменений объема в качестве сдвига необходимо принять наибольшее значение γ_* в соответствии с моделью. Изменение объема по этой причине может быть незначительным, так как сдвиг является постоянным.

Наконец, третьей причиной является возможное "расслоение" пласта на столбчатые структуры вертикальными зонами разрыхления или даже зонами пустот. Известно, что в условиях всестороннего неравномерного сжатия материал может разделиться поверхностями разрушения (сначала разрыхления, а затем пустотами), ориентированными вдоль главного направления наибольшего сжимающего напряжения. В рассматриваемой задаче таким напряжением является σ_z^* в сечении опорного давления. Даже при наличии поджимающих (ограничивающих) напряжений σ_x и σ_y могут развиваться растягивающие деформации ε_x , а, как было отмечено при выводе уравнения (3.17), эти деформации могут достигать значений γ_* . Вследствие этого в зоне $H' < H$ может накопиться перемещение U критической величины $W_{кр}$ [20]. При равномерном по сечению отжиме это может произойти за счет перемещения U по всему сечению, при неравномерном – за счет разности перемещения в срединном сечении и в сечении с $x = H'$.

При любом отжиме (равномерном или задержанном в сечениях с $\tau_{ост}$) в призабойной зоне может образоваться зона с $W_{кр}$ и отличным от нуля (или близким к нулю) значением $\sigma_x = p$ (см. формулу (3.14)). С точки зрения наблюдателя за перемещением на забое, это может проявиться в величине перемещений, которая значительно превышает рассчитанные по уравнению (3.17). С позиций механика, это может привести к увеличению объема за счет "среднего" разрыхления, которого фактически не происходит.

При возникновении областей разрыхления рассматриваемая задача распадается на две: одна – расчет напряженно-деформированного состояния непосредственно призабойной зоны (с учетом возможного поджатия $\sigma_x = p$ изнутри пласта) и вторая -повторение первой (исходной), с перемещением опорного давления в глубь пласта и "ложным" забоем при $x = H'$. Таких областей может быть несколько, это зависит от входных параметров задачи: горного давления и остаточной прочности материала в запредельном состоянии. Эта ситуация относится к новым, слабо изученным, хотя многие наблюдения за немонотонным поведением σ_z в призабойной зоне (вплоть до глубин нетронутого пласта) показывают, что этому следует уделять внимание [23].

Приведенный пример показывает качественные изменения в пространственном напряженно-деформированном состоянии при движении забоя из простого состояния [17,19]. Если в нетронутом горном массиве исходное состояние отлично от гидростатического, то может возникнуть иная картина развития деформаций - для анализа необходимо иметь сведения об исходном состоянии в пространстве и эти сведения можно получить только из опыта в натуральных условиях [24].

ЛИТЕРАТУРА

1. Протодьяконов М.М. Давление горных пород и рудничное крепление. 4.1, - М.: Гостехиздат, 1931.
2. Кузнецов Г.Н, и др. Моделирование проявлений горного давления. -М.: Недра, 1968
3. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. -М.: Углетехиздат, 1947.
4. Терцаги К. Теория механики грунтов. -М.: Госстройиздат, 1961.
5. Фисенко ГЛ. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. -М.: Недра, 1976.
6. Родионов В.Н. и др. Основы геомеханики.-М.: Недра, 1986,
7. Баклашов И.В. Деформирование и разрушение породных массивов. -М.: Недра, 1988.
8. Руппенейт К.В., Либерией Ю.М. Введение в механику горных пород. -М.: Госгортехиздат, 1960..

9. Христианович С.А., Михлин С.Г., Девисон Б.Б. Некоторые новые вопросы механики сплошной среды. -М., 1938.
10. Михлин С.Г. Об основной задаче горного давления. -ДАН СССР.-1945. Т. 49, №9.
11. Христианович С.А., Желтое ЮЛ. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта// Известия АН СССР. -1955. -№5. С. 3-41.
12. Шемякин Е.И. Две задачи механики горных пород, связанные с разработкой глубоких месторождений угля и руды // ФТПРПИ. -1975. -№6. -С. 29 - 45.
13. Булычев Н.С. Механика подземных сооружений. -М.: Недра, 1984.-382 с.
14. Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б., Шемякин Е.И. Новые методы расчета нагрузок на крепи // ФТПРПИ. -1976. -№ 3. -С.23-40.
15. Ревуженко А.Ф., Стажевский С.Б., Шемякин Е.И. Задачи механики сыпучих сред в горном деле //ФТПРПИ. -1982. -№3.
16. Ставрогин А.Н. Деформации и прочность горных пород // Труды ВНИМИ. -Я, 1968. - №70.
17. Кузнецов С.В. Об одной модели пористого грунта // ПМТФ. -1961. -ЛИ. -С. 85-94.
18. Ильющин А.А. Полная пластичность в процессах течения между жесткими плитами // ПММ, 1955 Т.19. -№6. -С.6-10
19. Ершов Л.В. О проявлении горного давления в горизонтальных выработках. -ДАН СССР, 1962 Т.145. -№2.
20. Atkinson I. The stability of shallow circular tunnel in dense sand during excavation an filling, Geotechnique. —1975, vol. 25 # 3.
21. Wilson A. The stability of underground working in the soft rocks of the coal mining. The journal of mining, 1983.
22. Shemyakin E.I. New problems in rock mechanics, edited by A.Kidybinski, A.A.Balkema. - 1988.
23. Shemyakin E.I. New problems in rock mechanics, edited by A.Kidybinski, A.A. Balkema 1988
24. Марков Г.А. Тектонические напряжения и горное давление Л. Наука, 1977