

## РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛАГИ В ГОРНОМ МАССИВЕ И ВЛИЯНИЕ ГОРНЫХ РАБОТ НА ОБВОДНЕНИЕ ВЫРАБОТОК

Носач А.К., Рязанцева Н.А., Бачурин Л.Л.

(КФ ДонГТУ)

Рязанцев Н.А.

(ПО «Красноармейскуголь»)

Согласно современным представлениям, в подземной гидросфере выделяют пять видов воды [1]: парообразную, твердую, физически свободную, физически и химически связанную. Химически связанную воду часто называют кристаллогидратной. К особому виду отнесена вода в надкритическом состоянии. При изменении параметров физического состояния среды возможны обратимые переходы различных видов воды.

Физически связанная вода подразделяется на прочносвязанную (адсорбционную) и рыхлосвязанную (пленочную). Прочносвязанная влага представляет собой расположенные на контакте с минеральной частицей слои в 1-3 ряда молекул воды. Содержание ее в породах редко превышает 1%. Непосредственно к прочносвязанному прилегает переходный, сольватный (или осмотический) слой толщиной до 10-20 молекул. В совокупности прочно- и рыхлосвязанную воду называют молекулярной. Максимальное содержание молекулярной воды в породах редко превышает (3-4)%.

При больших давлениях (300-500 МПа) почти вся молекулярная вода способна переходить в свободное состояние, образуя поровые растворы.

Свободная вода представлена капиллярной и гравитационной водой. Капиллярная вода вступает в движение лишь с момента раскрытия замкнутого объема пор горной породы при разрушении. Она заполняет поры и трещины с шириной менее 0,25 мм, удерживается силами поверхностного натяжения.

Гравитационная вода образуется при полном насыщении пор и трещин водой и перемещается под действием силы тяжести. Количество гравитационной воды зависит от гранулометрического состава пород, размера пор и трещин, степени изолированности их друг от друга.

Различают инфильтрационные (просачивающиеся сверху вниз) и фильтрационные (перемещающиеся в водоносном слое) воды. На больших глубинах движение фильтрационных вод связано с проявлениями горного давления, развитием тектонических процес-

сов. Фильтрационный поток направлен из зоны сжатия (уплотнения) в зону растяжения (разуплотнения).

Химически связанная (кристаллогидратная) вода разделяется на кристаллизационную и конституционную. Первая присутствует в кристаллической решетке минералов в виде единичных молекул или групп (сода, мирабилит, гипс, вермикулит и т.п.). Конституционная вода представляет собой ионы  $\text{OH}^-$  и  $\text{H}^+$ , которые превращаются в воду после выделения из минералов (каолинит, монтмориллонит). При определенных термодинамических параметрах химически связанная вода может переходить в свободную и физически связанную.

Таким образом, свободная вода в горных породах может существовать лишь в довольно крупных трещинах и порах с величиной раскрытия доли миллиметра. Подобное раскрытие трещин для нетронутого породного массива характерно для глубин до 900-1000 м. На больших глубинах ширина трещин существенно уменьшается и наличие свободной воды приурочено лишь к крупным тектоническим разломам и зонам дробления.

В изначально ненарушенных породах вода находится лишь в химически и, частично, в физически связанном состоянии. Образование остальных видов воды связано с изменением термодинамических условий нахождения флюида в породах в процессе структурно-фазовых переходов и разрушения горных пород, которое рассматривается в физике как критический структурный переход.

Литологический, петрографический, минеральный и химический состав толщи карбона Донбасса обуславливает наличие в структуре пород большого количества различного рода радикальных ионов и групп.

Современные представления о структуре угля [2, 3] свидетельствуют о наличии в нем ионов водорода, кислорода,  $\text{CO}^-$ ,  $\text{CN}^-$  и  $\text{OH}^-$  групп и разнообразных органических радикалов: метила  $-\text{CH}_3$ , винила  $-\text{CH}_2=\text{CH}$ , алила  $-\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_2$ , бензила  $-\text{C}_6\text{H}_5-\text{CH}_2$ , толила  $-\text{CH}_3-\text{C}_6\text{H}_5$ , этила  $-\text{C}_2\text{H}_5$ , пропила  $-\text{C}_3\text{H}_7$  и др.

В структуре различных силикатов, из которых состоят слои песчаников, глинистых и песчаных сланцев, присутствуют, кроме того [4] ионы фтора, хлора, азота, углерода и пр. В карбонатах также практически всегда присутствуют  $\text{CO}^-$ ,  $\text{CN}^-$  и  $\text{OH}^-$  группы.

В процессе естественного метаморфизма или искусственного воздействия на породы физическими полями различного рода,

происходит отщепление указанных радикалов с образованием воды, газов и некоторых других жидкостей.

Чаще всего горному инженеру приходится иметь дело с механической деструкцией горных пород при выемке полезного ископаемого и процессах ее сопровождающих (выдавливание боковых пород в рабочее пространство, обрушения, аномальные проявления горного давления, горные удары и внезапные выбросы).

На существование структурно-фазовых переходов в горных породах с образованием воды и метана в процессе метаморфизма и внезапных выбросов указывают многие авторы. Однако, наиболее ярким доказательством диссоциации химически связанной (кристаллогидратной) воды при механическом воздействии являются экспериментальные данные ДонФТИ НАИУ [5].

В качестве модельного кристаллогидрата в экспериментах была принята соль  $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ . Сравнение данных весового содержания жидкой воды в кристаллогидрате, обработанном разными давлениями, с данными [6] показало, что давление, обеспечивающее максимальное выделение жидкой воды из кристаллогидратной весьма близко к давлению первой и третьей тройных точек воды и льдов (соответственно 198-220 МПа и 479-636 МПа). При давлении области второй тройной точки (300-350 МПа) происходит «задавливание» жидкой воды в твердофазное состояние (рис.1).

При испытании угля использовались давления до 682 МПа (рис.1). Для испытаний использовались угли с исходной влажностью как более высокой, чем после обработки давлением (шлаты «Мазур-нижний», «Соленый», «Прасковиевский»), так и более низкой («Мазур-верхний», «Подмазур», «Андреевский»).

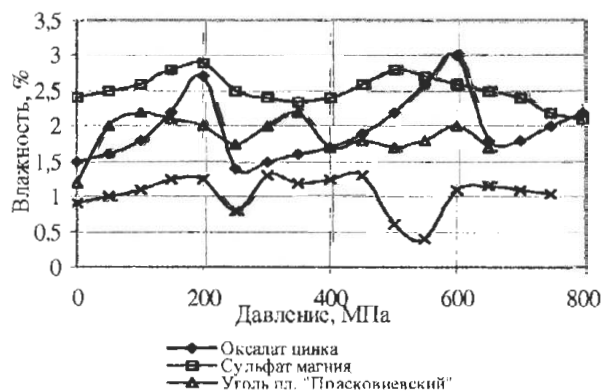


Рис. 1. Зависимость содержания жидкой воды от величины давления.

Испытания показали, что при скоростях деформирования 10-15 МПа/с (динамические нагрузки) у углей действительно проявляются специфические свойства кристаллогидратов: ступенчатость дегидратации, смещение температуры максимального выделения жидкой воды после обработки давлением, существование областей давлений, обеспечивающих максимальное выделение жидкой воды. Подтвердилась гипотеза о том, что под давлением осуществляется обратимый переход кристаллогидратная – жидкая вода. Наибольшее содержание жидкой воды в углях (до 1,6 – 2 %) наблюдается после воздействия давлений 198 – 220 МПа (первая тройная точка воды и льдов), а также 479 – 636 МПа (третья тройная точка). Минимум влажности отмечается при давлениях 250 – 400 МПа (вторая тройная точка воды и льдов).

При низких скоростях нагружения (менее 5 МПа/с) в интервале давлений до 200 МПа, минимум влажности наблюдается при 150 МПа., т.е. происходит переход части жидкой воды в твердую фазу (рис.2).

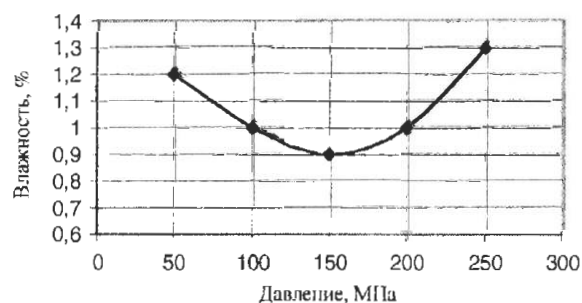


Рис. 2. Изменение содержания влаги в условиях трехосного сжатия при скоростях нагружения менее 5 МПа/с.

Для угольных пластов, залегающих на глубинах 600-1200м, с учетом коэффициента концентрации напряжений в зоне опорного давления  $K_{од} = 2-3$ , нагрузки на пласт составляют 30 – 90 МПа. При ведении взрывных работ в метре от шпура дополнительная пригрузка при взрыве заряда составляет 60-70 МПа, а в зоне взрыва достигает сотен мегапаскалей. То есть, при динамических воздействиях на массив достижение первой и, даже, третьей тройной точки воды и льдов вполне осуществимо. Таким образом, переход кристаллогидратной (химически связанной) воды в физически связанную и свободную на достигнутых глубинах разработки реален.

При медленном нарастании давления за счет глубины разработки на указанных глубинах идет обратный процесс, и влажность пород снижается. Достижение первой трой-

ной точки при квазистатических процессах возможно только на глубинах 5-10 км, поэтому именно в этом интервале происходит переход воды в жидкую фазу с дроблением пород, что и зафиксировано на Кольской сверхглубокой скважине.

При проведении горных выработок нарушение равновесное состояния горного массива приводит к переходу части физически и химически связанной воды в свободную.

Наличие гидрогеодеформационных волн в горном массиве [7, 8] приводит к возникновению вокруг выработок интерференционной картины за счет наложения падающих и отраженных волн. Чередование зон сжатия и растяжения обуславливает перетоки воды и мозаичное ее распределение в горном массиве. Повышенная влажность приурочена к зонам растяжения или разуплотнения, пониженная – к зонам сжатия или уплотнения. Указанная закономерность может нарушаться лишь при динамических явлениях за счет структурно-фазовых переходов.

На рис. 3 показано распределение естественной влаги в угольном пласте «Безымянный» шахты «Красный Октябрь» ПО «Орджоникидзеуголь». Общая влажность, определенная методом ЯМР (ядерный магнитный резонанс) колеблется в пределах 0,8-1,3%. При этом, как по падению, так и по простиранию, влажность изменяется периодически (волнообразно). Длина волны по простиранию – 20-35 м, по падению – 10-25 м.

В процессе искусственного увлажнения угольного массива с использованием водных растворов ПАВ (поверхностно-активных веществ) наступает полное влагонасыщение, влажность увеличивается практически вдвое, однако минимумы и максимумы влажности сохраняют свои координаты, имевшиеся при

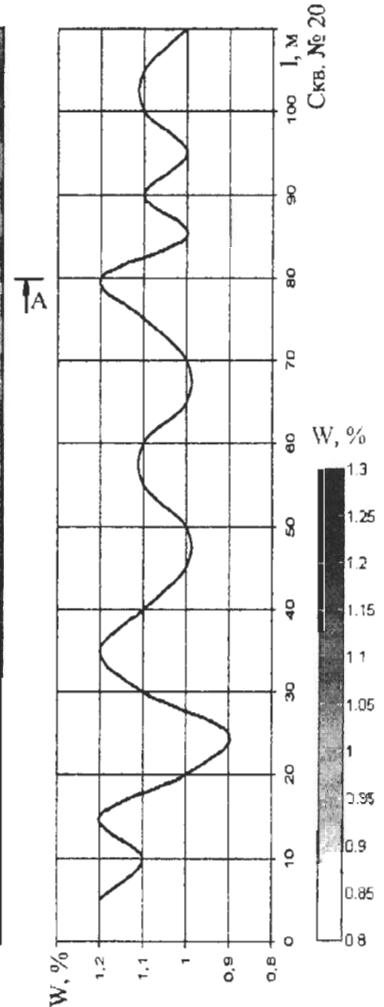
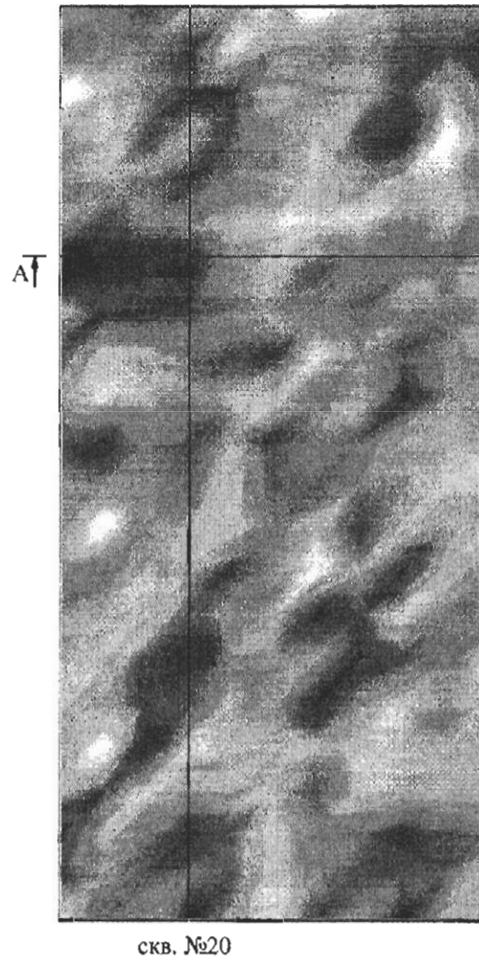
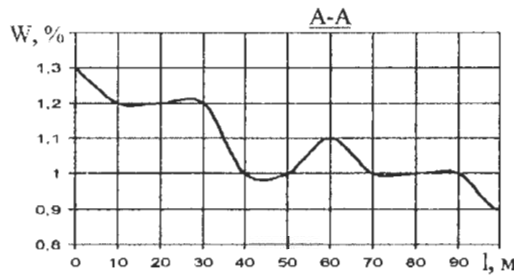


Рис. 3. Распределение естественной влаги в угольном пласте.

естественном распределении (рис. 4).

Аналогичная картина наблюдается и на пласте «Пята» шахтоуправления «Александровское».

Следует отметить, что при полном влагонасыщении длина волн распределения влаги не увеличивается, что свидетельствует о наличии в пласте, в основном, физически и химически связанной влаги. Свободная влага представлена, в основном, капиллярной водой, которая заполняет поры и трещины с раскрытием менее 0,25 мм и распространяется под действием капиллярных сил преимущественно по простиранию. Учитывая, что падение указанных пластов крутое, можно

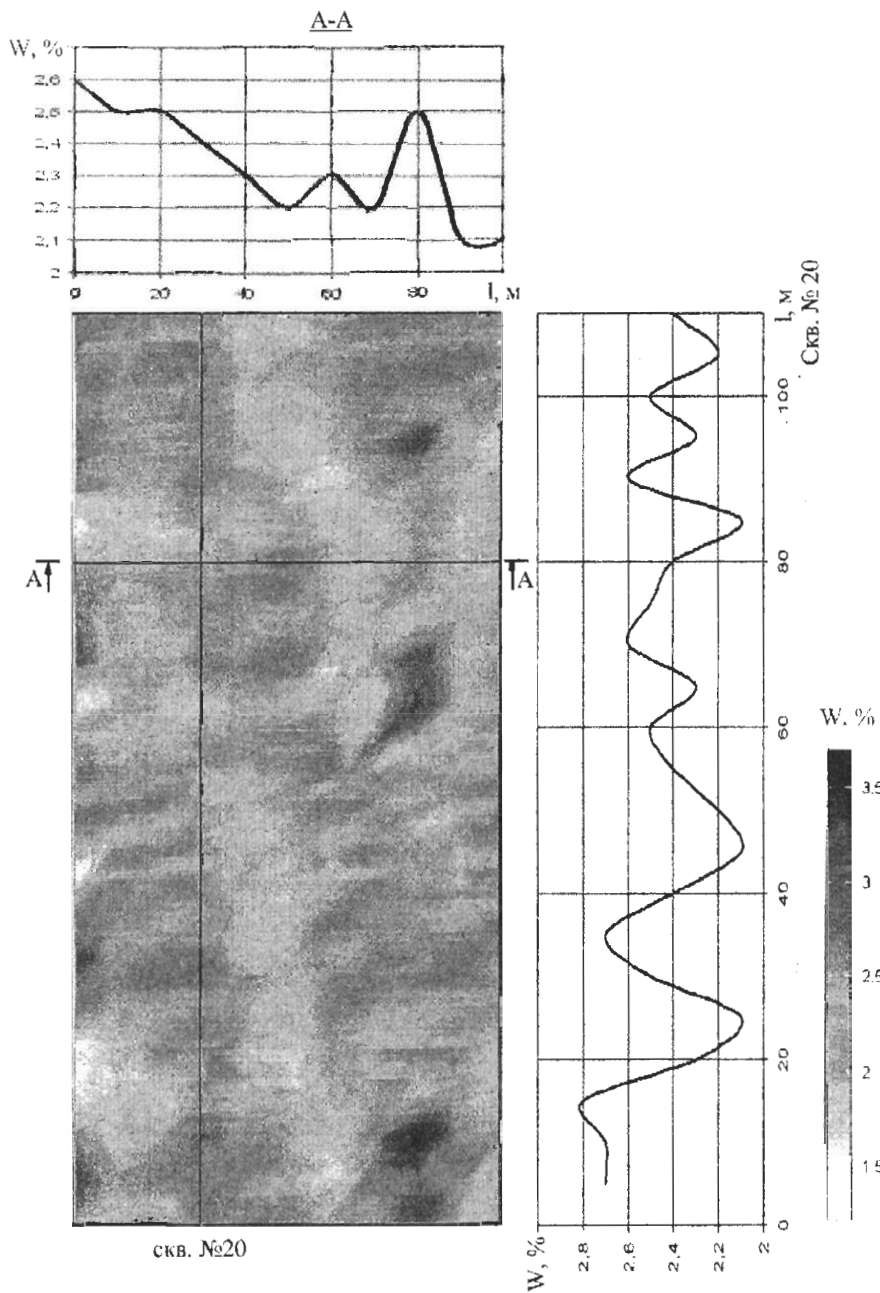


Рис. 4. Распределение влаги в пласте после увлажнения с использованием ПАВ.

констатировать отсутствие внутри пласта гравитационной воды, так как перемещения воды по падению не наблюдается.

Аналогичный характер распределения влаги наблюдается также и во вмещающих породах. То есть, для ощутимых водопритоков из разрабатываемой углепородной толщи оснований практически нет.

Таким образом, гравитационная влага приурочена к водоносным горизонтам, тектоническим и техногенным трещинам с раскрытием более 0,25 мм. Осуществление гидравлической связи между источником воды и горной выработкой происходит, чаще всего, за счет искусственной (техногенной) и тектонической трещиноватости. Техногенные и

тектонические трещины имеют разную длину и раскрытие. Притоки существенно возрастают при разрушении глинистых водоупорных слоев в результате их деформирования под влиянием горного давления (пучение, вывалы, складкообразование в кровле).

Над подземными горными выработками возникает оседание земной поверхности. Оседание происходит в результате двух процессов: сдвижения горных пород над выработанным пространством и уплотнения пород в связи с ростом эффективного давления в результате снятия гидростатического давления при дренировании подземных вод. Причем сдвижения, связанные с уплотнением пород могут быть неверно интерпретированы, как обусловленные первой причиной [9].

В результате сдвижения подработанной толщи, происходит изменение условий залегания пород, возникают зоны опорного давления и зоны разгрузки. В зонах опорного давления происходит переход свободной воды в химически связанную и влажность пород уменьшается. В зонах разгрузки и обрушения

растет трещиноватость, падает прочность, увеличивается проницаемость, что, в конечном итоге, обуславливает увеличение притоков воды в горные выработки из вышележащих водоносных горизонтов зоны дренажа.

При интенсивной откачке подземных вод в результате водопонижения наблюдается оседание земной поверхности. Дренирование подземных вод приводит к уменьшению порового давления, увеличению эффективных сжимающих напряжений, что обуславливает схлопывание пор и сжатие сдренированных пород. При наличии воды в порах  $\sigma_{эф} = \gamma_{ср} h - H \gamma_{в}$  ( $\sigma_{эф}$  – эффективные напряжения в породе,  $\gamma_{ср}$  – средняя плотность породы,  $\gamma_{в}$

– плотность угля,  $H$  – высота столба воды,  $h$  – глубина). После дренирования  $\sigma_{эф} = \gamma_{ср} h$ , т.е. возникает дополнительное уплотняющее давление равное весу столба воды.

При уплотнении пород происходит отжатие воды из порового пространства, которое следует учитывать при прогнозах поступления воды в выработки, даже если полная влагоемкость и не превышает 3-4%.

Водообильность выработок существенно определяется глубиной ведения работ. На больших глубинах обводнение обусловлено, в основном, за счет трещинно-поровых вод карбона и перехода химически связанной воды в свободную. К примеру: водоприток шахты «Центральная», при средней глубине разработки 580 м, составляет 500 куб.м/час., им. Димитрова, при средней глубине 687 м – 350 куб. м/час., «Родинская», при средней глубине 690 м – 250 куб.м/час., им. Стаханова, при средней глубине 1030 м – 160 куб. м/час.

Объясняется это, прежде всего сменой механизма разрушения пород, уменьшением зияния трещин и проницаемости толщи, а также ростом горного давления и переходом свободной воды в химически связанную. При этом вода покровных отложений в меньшей степени подпитывает водоносные горизонты карбона, чем на малых глубинах. Повышенные водопритоки на больших глубинах связывают, в основном, с тектоническими разломами.

На больших глубинах фильтрационные свойства пород во многом определяются также соотношением компонент поля напряжений в горном массиве. Поскольку максимальной компонентой поля напряжений является, чаще всего, субширотная горизонтальная составляющая [10], а вертикальная компонента имеет либо промежуточное, либо минимальное значение, при ведении горных работ гидродинамические характеристики пород значительно изменяются.

В Красноармейском регионе в нетронутом массиве прослеживается три системы трещин: 1) азимут падения 167-180° (субширотная система трещин); 2) азимут падения 270-305° (субмеридиональная система трещин); 3) азимут падения 90° (субмеридиональная система трещин). При этом наиболее четко выражены первые две системы. Угол падения трещин более 70°. Проницаемость пород в направлении плоскостей естественных трещин на порядок больше, чем перпендикулярно им и составляет  $0,2 \times 10^{-3}$  мд.

При наличии субширотных трещин и

северо-западном простирании пластов, в процессе проведения выработок и отработке лав по простиранию раскрываются естественные трещины и проницаемость пород возрастает. При проведении выработок вкрест простиранию, по падению-восстанию, а также при отработке лав по падению-восстанию, естественная трещиноватость «задавливается», проницаемость уменьшается до  $10^{-5}$  мд, а затем параллельно открытым поверхностям формируется совершенно новая система техногенных трещин с проницаемостью вдоль нее единицы миллидарси.

При наличии субмеридиональных естественных трещин, картина обратная. При работе по простиранию существующая система трещин «задавливается» и формируется новая, а при работе вкрест простирания и по падению-восстанию, раскрываются имеющиеся естественные трещины.

При наличии нескольких разнонаправленных систем естественных трещин картина усложняется, но в целом тенденция к уменьшению проницаемости за счет «залечивания» трещин в зонах повышенного горного давления сохраняется. При этом уменьшение проницаемости происходит почти на два порядка. Вместе с этим вдоль поверхностей обнажения формируется новая система техногенных трещин с проницаемостью 0,01-0,05 мд. Часто это не одна система, а две (ортогонально напластованию и с наклоном на массив). Кроме того, происходит расслоение массива в выработанном пространстве и разрушение слоев по трещинам, образованным в зоне повышенного горного давления.

Таким образом, горные работы могут как увеличивать, так и уменьшать проницаемость массива, причем для обеспечения фильтрации градиент давления воды и газа нужен довольно высокий (десятки мегапаскаль на метр). И лишь при движении воды по трещинам с большим зиянием необходимый градиент давления на один-два порядка меньше. Обводнение выработок за счет фильтрации трещинно-поровых вод можно считать пренебрежимо малым. Обводнение связано с зонами дробления, приуроченными к тектоническим разрывам и техногенным трещинам, образующимся в зонах опорного давления и раскрывающимся при обрушении пород кровли или разгрузки почвы. При этом подпитка этих зон водой осуществляется за счет водоносных горизонтов покровных отложений.

**Резюме.** В ненарушенном горном массиве (и в литосфере в целом) вода первоначально находится в химически и, частично, в физически связанном состоянии. В зависимости от величины давления и температуры происходит обратимый переход воды из хи-



мически связанного (кристаллогидратного) состояния в жидкую фазу и обратно. Все виды воды, наблюдаемые в горном массиве, обязаны своим происхождением химически связанной воде

Распределение влаги в массиве горных пород в значительной мере определяется его напряженно-деформированным состоянием и может изменяться под воздействием искусственных факторов, способствующих структурно-фазовым переходам различных видов воды, что необходимо учитывать при динамических процессах, тем более что степень влагонасыщения горных пород и вид воды (связанная, свободная) оказывают значительное влияние на физико-механические свойства последних.

Статические запасы подземных вод проявляются только при нарушении сплошности массива под воздействием естественных или техногенных факторов.

#### Литература:

1. Гальперин А.М., Зайцев В.С., Норватов Ю.А. Гидрогеология и инженерная геология: Учебн. для вузов. - М.: Недра, 1989. - 383с.
2. Касаточкин В.И., Ларина Н.К. Строение и свойства природных углей. М.: Недра, 1975-159 с.
3. Андреев М.М. Технологические аспекты радикального повышения эффективности угледобычи./ Уголь Украины, 1998, №4. С.12-13.
4. Физическая химия силикатов. Киев: Вища школа, 1977.- 350с.
5. Исследования состояния и содержания химически связанной воды в углях и горных породах при высоких давлениях / Стариков Г.П., Павлов В.И., Шамаев В.В. Отчет по поисковой теме. Донецк: ДонФТИ НАНУ, 1989.- 60с.
6. Справочник химика. Т.1.- М.: ГХИ, 1963.- 592с.
7. Вартамян Г.С., Куликов Г.В. Гидрогеодеформационное поле Земли. //Доклады АН СССР, 1982. -т.262.- №2.- С.310-314.
8. Шамаев В.В., Стрельцов В.А. Концепция геодеформационных полей в физике Земли //Физика и техника высоких давлений, 1990.- Вып. 33.- С. 48-58.
10. Корчемагин В.А. Геологическая структура и поля напряжений в связи с эволюцией эндогенных режимов Донбасса. Дисс. докт. геол.-мин. наук. М.: 1984.

## РЕШЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ШАХТ

Кольчик Е.И., Носач В. А., Кольчик И.Е.

При проектировании угольных шахт определяются: размеры шахтного поля и запасы угля; производственная мощность шахты; система вскрытия, подготовка и разработка; место расположения горных выработок, их сечение и способы проведения; количество действующих шахт и резервных очистных забоев; способы механизации очистных работ; транспорт угля, породы, материалов и людей; водоотлив, проветривание и тепловой режим шахты; очередность и срок строительства; технико-экономические показатели и др.

Эффективность работы угольных шахт существенно зависит от проектных разработок и принятых при проектировании систем вскрытия, подготовки и разработки угольных пластов [[1]].

В настоящее время имеется большой опыт проектирования новых угольных шахт.

Известно, что с увеличением глубины залегания пластов увеличиваются затраты на строительство шахты. Для обеспечения быстрой окупаемости капитальных затрат и эффективной работы шахты в течение всего срока службы увеличивают проектную мощность шахты, а следовательно и размеры шахтного поля.

На основании статистических данных установлена зависимость изменения размеров шахтного поля от начальной глубины разработки

$$S_n = 15 H_n + 4, \text{ км} \quad (1)$$

$$H_n = 3,3 H_1 + 2, \text{ км}, \quad (2)$$

где  $S_n$ ,  $H_n$  – протяженность шахтного поля соответственно по простиранию и падению, км;

$H_1$  – начальная глубина разработки, км.

Далее определяются промышленные запасы в пределах шахтного поля [1]

$$Z_{пр} = C_u \cdot 10^6 \cdot H_n \sum (m_i \cdot \gamma_i), \text{ т} \quad (3)$$

где  $C_u$  – коэффициент извлечения угля. Для тонких пластов  $C_u = 0,9 \dots 0,92$ ; для пластов средней мощности  $C_u = 0,85 \dots 0,88$ ;

$m_i$  – мощность  $i$ -го пласта, м;

$\gamma_i$  – объемная плотность угля  $i$ -го пласта, т/м<sup>3</sup>.

После определения запасов угля рассчитывается производственная мощность