

ропетровск, 2004. – Вып. 48. – С. 133-142.

6. Кулинич В.С., Перепелица В.Г., Шевченко В.В., Курносое А.Т., Шматовский Л.Д., Гуня Д.П. Результаты комплексной оценки геомеханического состояния углеродного массива в зоне дегазации пласта l_1 шахты им. А.Ф.Засядько / Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / Ин-т геотехн. механ. им. Н.С.Полякова НАН Украины. - Днепропетровск, 2002. – Вып. 37. – С. 97-104.

УДК 622.831

Д-р техн. наук, проф. Б.М. Усаченко,
асп. Е.А. Слащёва (ИГТМ НАН Украины)

ИССЛЕДОВАНИЕ И ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ В ТРЕЩИНОВАТЫХ МАССИВАХ

Приведено результати експериментальних і теоретичних досліджень фільтраційних процесів на основі методів електрометричного контролю та математичного моделювання тріщинуватого водонасиченого масиву.

STUDY AND EXPRESS-ESTIMATION FILTRATION PROCESSES IN FISSURED MASSIFS

The results experimental and analytical investigations of filtration processes are reduced on the basis of methods of electrometric check and mathematical simulation of a fissured saturated massif

Задача прогноза устойчивости геоматериалов в обнажениях по изменению их электропроводящих свойств под воздействием гидрогеологических факторов весьма актуальна. Последовательность ее выполнения включает в себя исследования на основе математического моделирования геомеханических процессов в породном массиве, решение конкретных задач прогноза методами геомеханики, гидрогеологии и инженерной геологии и проведение контрольных экспериментальных геофизических измерений.

Породный массив, включающий водонасыщенные породы, рассматривается как единая гидрогеомеханическая система. Воздействие шахтных вод вызывает существенные деформации отдельных участков массива пород, набухание глинистых фракций и выщелачивание скальных и прочных осадочных пород. Однако следует отдельно остановиться на дополнительных возможностях, которые представляет численный метод конечных элементов при решении фильтрационных задач «в режиме реального времени», т.е. в плане хотя бы и приближенного, но экспрессного получения первичных результатов.

Даже если основные механические характеристики образцов горных пород, слагающие массивы различных типов, близки между собой, устойчивость породного массива может быть различной. На нее влияет слоистость, последовательность напластования, анизотропия, трещиноватость, гидрогеология и другие факторы. Породы нижних слоев осадочных толщ могут быть подвержены процессам окаменения за счет их уплотнения, обезвоживания и цементации. Изменчивые формы и невыдержанные чередования пород с различными свойствами обуславливают неравномерность распределения напряжений, резко усиливающуюся при проведении выработок.

Фильтрация – движение жидкости (воды, нефти) или газа (воздуха, природного газа) сквозь пористую среду [1]. Грунт рассматривают как единую систему, состоящую из минеральных и коллоидных частиц воды с растворенными солями и газообразной фазы (воздух, пары воды). Свойства обычных грунтов являются промежуточными между свойствами песков и глин. Грунты, у которых содержание глинистых частиц превышает 60 % (по объему) от общего количества частиц, называют тяжелыми глинами; если количество глинистых частиц колеблется между 30 и 60 % - их называют глинами. Суглинки (тяжелые, средние и легкие) содержат от 10 до 30 % глинистых частиц, супеси (тяжелые и легкие) – от 3 до 10 % и пески – до 3 % глинистых частиц [2]. Сыпучие горные породы имеют низкую влагоёмкость и высокую проницаемость, следовательно, имеют склонность к проявлению плавунных свойств и фильтрационных деформаций.

В строительной механике грунты классифицируют по размерам частиц. Каменистую часть почвы составляют частицы более 3 мм; частицы от 0,01 до 3 мм называют «физическим» песком, частицы от 0,0001 до 0,001 – илом, мельче 0,0001 мм – коллоидными частицами. Различают следующие формы воды в грунтах: водяной пар, гигроскопическую воду, пленочную воду, гравитационную воду, воду в твердом состоянии, кристаллическую воду и химически связанную воду [2].

Пластические (глинистые) горные породы в процессе нагружения могут приобретать любую физически возможную плотность, переходя от текучего в пластичное и твёрдое состояния. Зависимость деформаций от напряжений носит резко выраженный нелинейный характер уже в небольших диапазонах нагружения. Деформации глинистых пород обычно необратимы. Для них характерны низкая прочность, высокая сжимаемость, низкая проницаемость и большая влагоёмкость. Наличие в глинистых породах свободной воды влечёт за собой существенное изменение их механических свойств и оказывает решающее влияние на характер сжимаемости. Водонасыщенная горная порода может сжиматься лишь при оттоке воды из пор и, таким образом, избыточное поровое давление компенсирует часть сжимающей нагрузки, поэтому в них могут возникать весьма высокие напряжения. Произвести экспериментальные измерения напряжений в таких породах в условиях полного водонасыщения практически не представляется возможным.

Для грунтов (пески, глины, торфяные грунты, микротрещиноватые горные породы, в том числе скальные) имеет место линейная зависимость скорости фильтрации от пьезометрического уклона (закон Дарси) [2]:

$$v_{\delta} = \hat{E}_{\delta} J = -\hat{E}_{\delta} \frac{dh}{ds}, \quad (1)$$

где \hat{E}_{δ} – коэффициент фильтрации; J – градиент напора. Для простейших схем фильтрации градиент напора (гидравлический уклон) равен отношению

разности напоров между уровнями грунтовых вод \hat{I} к длине пути фильтрации S :

$$v_{\delta} = \hat{E}_{\delta} \frac{H}{S}. \quad (2)$$

Прочностные свойства мягких глинистых пород существенно зависят от их слоистости, которая предопределяет их анизотропию. В практике горного дела приходится сталкиваться с переуплотнёнными глинистыми породами (аргиллиты, алевролиты). Прочность переуплотнённых пластических горных пород имеет значительный разброс. Поэтому при решении задач устойчивости необходимо учитывать не пиковую, а остаточную прочность.

В плотных глинах и тяжелых суглинках вода содержится в молекулярно связанном виде, а явление фильтрации возникает лишь тогда, когда величина градиента напора превышает некоторое значение I_0 , называемое начальным градиентом [2]:

$$v_{\delta} = -\hat{E}_{\delta} \left(\frac{dh}{ds} + I_0 \right) = \hat{E}_{\delta} (J - I_0). \quad (3)$$

Для очень плотных глин I_0 может достигать значений, равных 20-30.

Основные факторы, влияющие на изменение устойчивости массива, его прочностных и деформационных свойств: величина и направление воздействующей нагрузки, вид и длительность нагружения, влажность и температура среды, размокаемость пород. Они оказывают влияние на механические характеристики горных пород (пределы прочности на одноосное сжатие и растяжение, сцепление, модули упругости и деформации, скорости распространения волн, параметры ползучести, разрыхляемость, трещиноватость), плотностные (удельный и объёмный вес, плотность, пористость), тепловые (теплопроводность, теплоёмкость), электромагнитные (удельное электросопротивление, диэлектрическую проницаемость) и другие. В зависимости от интенсивности внешнего воздействия различные физические свойства изменяются в большей или меньшей степени. Так как при водонасыщении произвести учёт всех факторов невозможно, то очевидно, что необходима оценка и определение наиболее влияющих параметров.

Наличие воды в порах горных пород в количестве, близком к водонасыщению, кардинально меняет ее поведение. Влияние водонасыщения сказывается на изменении характера связи между частицами пород, при этом, у твердых рассыпчатых пород при насыщении водой силы сцепления резко снижаются или исчезают, а у скальных, полускальных или осадочных цельных пород снижаются силы сцепления между блоками.

Водонасыщенные породы представляют собой дисперсные тела, физико-механические характеристики которых при решении задач геомеханики необхо-

димо учитывать отдельно, с достаточной для расчётов точностью. Для водонасыщенных пород установлены и общие физические закономерности. Горные породы, которые сформированы на глинистом цементе, в воде размокают полностью за 20 суток и менее, песчаники снижают свою прочность примерно в 1,5 раза.

Твёрдые горные породы достаточно устойчивы к действию подземных вод, если в них отсутствуют растворимые минералы. Снижение прочности водонасыщенных пород в зависимости от прочности пород в их естественном состоянии для песчаников и известняков происходит по корреляционной зависимости:

$$\sigma_{\dot{\alpha}\dot{\epsilon}}^w = 1,924 + 0,67\sigma_{\dot{\eta}\dot{\alpha}\dot{\epsilon}}, \text{ (МПа)}, \quad (4)$$

где $\sigma_{\dot{\eta}\dot{\alpha}\dot{\epsilon}}^w$, $\sigma_{\dot{\eta}\dot{\alpha}\dot{\epsilon}}$ - пределы прочности соответственно при водонасыщении и в сухом состоянии (коэффициент корреляции $R=0,61$, погрешность $SR=37,5$).

Глинистые породы размокают полностью, если принять остаточную прочность водонасыщенных глинистых пород равной $\sigma_{\dot{\eta}\dot{\alpha}\dot{\epsilon}}/3$, то обобщенная корреляционная зависимость примет вид:

$$\sigma_{\dot{\epsilon}\dot{\lambda}}^w = -2,49 + 0,79\sigma_{\dot{\sigma}\dot{\lambda}}, \text{ (МПа)}, \quad (5)$$

при $R=0,76$; $SR=30,4$.

Горные породы представляют собой многокомпонентные системы, включающие твёрдую, жидкую и газообразную фазы, которые по прочностным и деформационным свойствам разделяются на твёрдые, сыпучие и пластические в зависимости от породообразующих минералов.

Способность горных пород деформироваться во времени при неизменной внешней нагрузке проявляется в виде ползучести, релаксации напряжений и характеризуется величиной длительной прочности. Хрупкие контакты скелета породы необратимо нарушаются при малых деформациях. Одновременно начинается нарушение вязких контактов, при этом порода проходит две стадии деформирования: стадию неустановившейся ползучести, на которой заканчивается переориентация частиц и полностью разрушаются хрупкие контакты, а суммарная прочность новых контактов возрастает; стадию установившейся ползучести, на которой скорость деформации почти постоянна [3].

Увеличение нагрузки выше предельных напряжений приводит к прорастанию внутренних дефектов (трещиноватости) и при нарушении сцепления деформирование приобретает ярко выраженный нелинейный характер. В предельной области происходит разрушение образцов со стабилизацией сопротивляемости на уровне остаточной прочности. Деформации несвязных пород протекают мгновенно, они почти всегда частично необратимы и связь их с нагрузками оказывается линейной в значительно более узких интервалах нагружения. Деформации раздельно-зернистых пород возрастают при динамическом нагружении и полностью определяются нагрузкой, так как они сложены химически прочными минералами. При первичном гидростатическом сжатии накаплива-

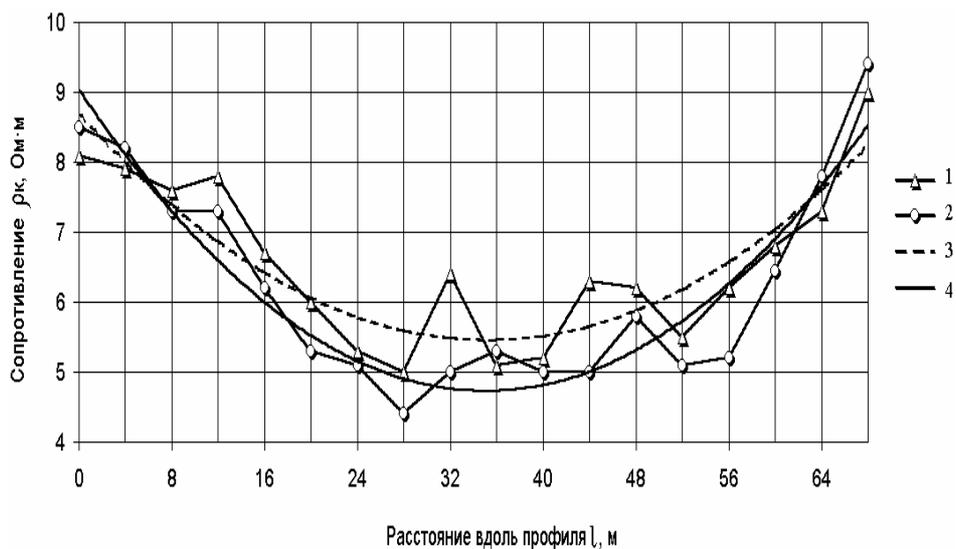
ются пластические деформации уплотнения, при этом коэффициент пористости изменяется незначительно. Характерным свойством этих пород является разрыхляемость даже при небольшом сдвиге. В этой связи, для горных пород в областях сжатия предпочтение отдается теории Кулона-Мора, а в областях растяжения (провисающих обнаженных массивов) – теории растягивающих напряжений, т.е. прочности на разрыв.

Трещиноватый массив горных пород можно рассматривать как некогда монолитный и подвергнутый до определённой степени запредельному деформированию, прочность которого находится в промежутке между предельной и остаточной прочностью. На глубине в породном массиве трещины могут быть плотно сомкнуты и в их плоскостях может сохраняться значительное сцепление – до 20-30% от величины сцепления в сплошном теле [4]. Трещиноватость вызывает общее снижение прочности и рост проницаемости, а также усиливает механическую и фильтрационную анизотропию горного массива.

Оценка трещиноватости производится визуальными способами с замером расстояний между параллельными системами трещин и определение частоты их расположения. В практике используются коэффициенты структурного ослабления, характеризующие степень снижения показателей соответствующих механических свойств. Для мелкоблоковой трещиноватости этот коэффициент составляет 0,1-0,2, для нарушенных пород – 0,01-0,02, для микротрещин – близок к 0,9 [3].

Для учета трещиноватости в геомеханических расчетных моделях приложение нагрузки необходимо производить вплоть до разрушения элементов, фактически до начала зарождения трещин. Этим приемом уже частично будет учитываться трещиноватость, а также установлены области зарождения первичных техногенных трещин. Второй путь учета трещиноватости - заложение в модель параметров остаточной прочности, определенной расчетным путем по коэффициентам структурного ослабления или экспериментально в режиме запредельного деформирования на жестких испытательных системах [5].

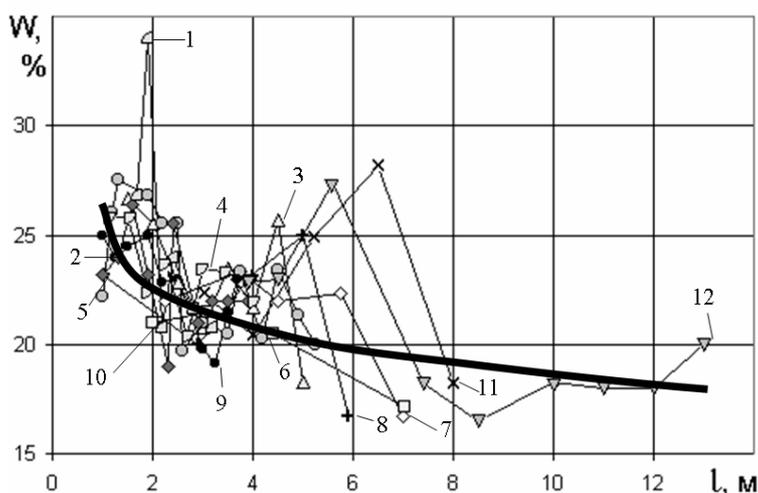
Для экспресс-контроля трещиноватости непосредственно на опасных участках горнотехнических сооружений проведены электрометрические исследования фильтрационных и геомеханических параметров. Как известно, основными факторами, определяющими величину электросопротивления пород, являются: сопротивление непосредственно грунта, пород или искусственных слагающих материалов; сопротивление насыщающих грунтовых вод; пористость, трещиноватость или разрыхленность массива [6]. При этом влажность грунта и его трещиноватость чаще всего изменяют сопротивление пород в противоположных направлениях: влажность снижает сопротивление, а трещиноватость его повышает. Поскольку уровень воды в грунте или породе определяется депрессионной кривой, которая характеризуется непрерывностью и плавными переходами, то и на кривых электропрофилирования или вертикального электрического зондирования влияние изменения уровня грунтовых вод более плавное, чем резкие изменения электросопротивления при наличии трещин в породе или металла в грунте, рис. 1.



1 – до наполнения водой; 2 – после наполнения; 3 – параболическая модель, аппроксимирующая данные графика 1 ($\rho_k = 0,0026l^2 - 0,184l + 8,70$); 4 – параболическая модель, аппроксимирующая данные графика 2 ($\rho_k = 0,0035l^2 - 0,247l + 9,04$)

Рис. 1 – Графики изменения кажущегося электросопротивления вдоль профиля

Результаты измерений кажущегося электрического сопротивления по профилям на Ивановском групповом водопроводе, частично представленные на рис. 1 и отражающие изменение влагонасыщения грунта, позволили выявить значительно увлажненные участки вблизи водосодержащих отстойников, зоны фильтрации воды в различных направлениях, расширение зоны увлажнения, и, в конечном итоге, локализовать и устранить скрытые прорывы воды в отстойнике. Эти результаты объяснили изменения уровня грунтовых вод, влажности и плотности грунта, рис. 2, 3.



1, 2, ..., 12 – номера измерительных скважин

Рис. 2 – Изменение влажности грунта с глубиной при длительных аварийных подтоплениях вокруг отстойников ($W = 20,047 + \frac{6,458}{l}$; $SR = 2,617$)

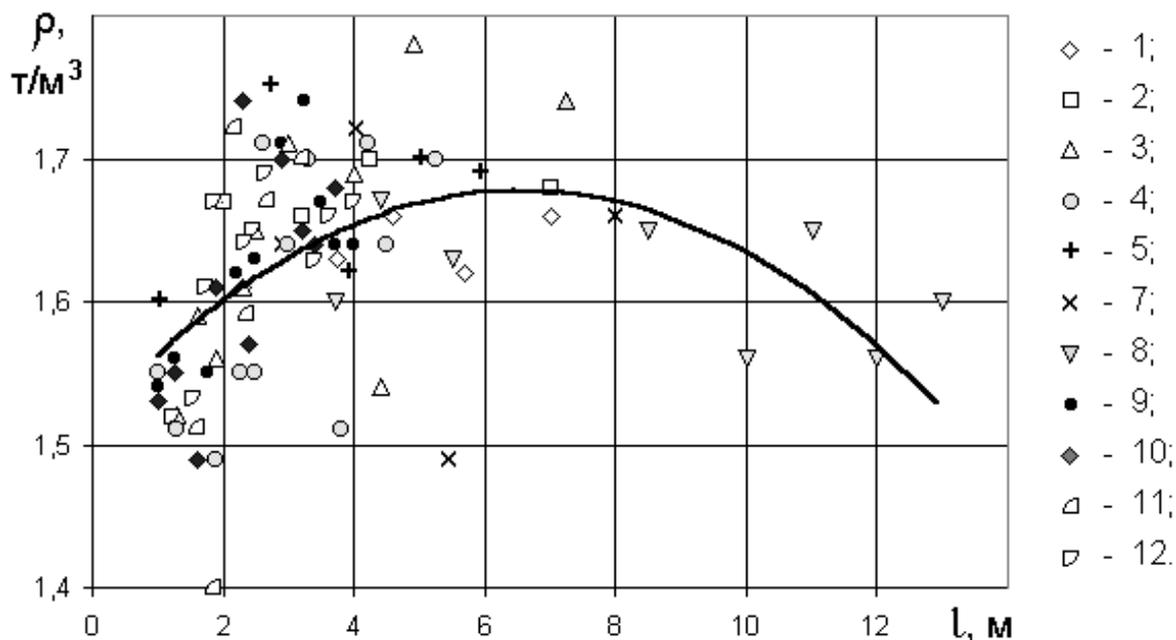


Рис. 3 – Изменение плотности грунта с глубиной при длительных аварийных подтоплениях вокруг отстойников ($\rho = 1,518 + 0,048l - 0,00365l^2$; $SR = 0,068$): 1, 2, ..., 12 – номера измерительных скважин.

Установлено, что влагонасыщение грунта в зависимости от глубины происходит по гиперболической закономерности (рис. 2), тогда как плотность сначала увеличивается, а затем снижается по параболической зависимости (рис. 3), что связано с просадочными явлениями в грунте и с его уплотнением в верхнем влагосодержащем слое.

При измерениях следует учитывать возможность наличия массивных металлических предметов в грунтовой толще, которые по своему воздействию на результаты измерения могут быть адекватными зонам увлажнения, погрешность в пределах 20 % вносят и погодные условия. При интерпретации результатов измерений имеет значение не только абсолютная величина информативного параметра в той или иной точке, но и общий характер его изменения в соседних точках, а также на соседних профилях, рис. 3. Например, резкая аномалия в изолированной точке может быть вызвана наличием под слоем земли металлических предметов, и не иметь никакого отношения к геофильтрационным процессам. Трассировку геофильтрационных потоков можно осуществить выделением аномальных зон по профилям, анализом возможных причин их возникновения, а также учетом дополнительной информации, полученной в процессе использования других методов при комплексном обследовании, но наиболее эффективным при этом является метод картирования, рис. 4. Исследования выполнены возле мостовой опоры №3 на заводе им. Петровского. Из-за высокой насыщенности контролируемой грунтовой площадки разнообразными техническими и технологическими объектами (два моста, железная дорога, автомобильная дорога, трамвайные пути, ручей Западный, трубопровод сброса горячей воды и различные вспомогательные трубопроводы) равномерную сетку из-

мерений создать не удалось, но к этому стремились и в каком-то первом приближении ее можно считать равномерной. Однако по результатам картирования четко зафиксирован сильно увлажненный участок в зоне от 4 до 8 м, который примыкает к колонне №3 с трещинами.

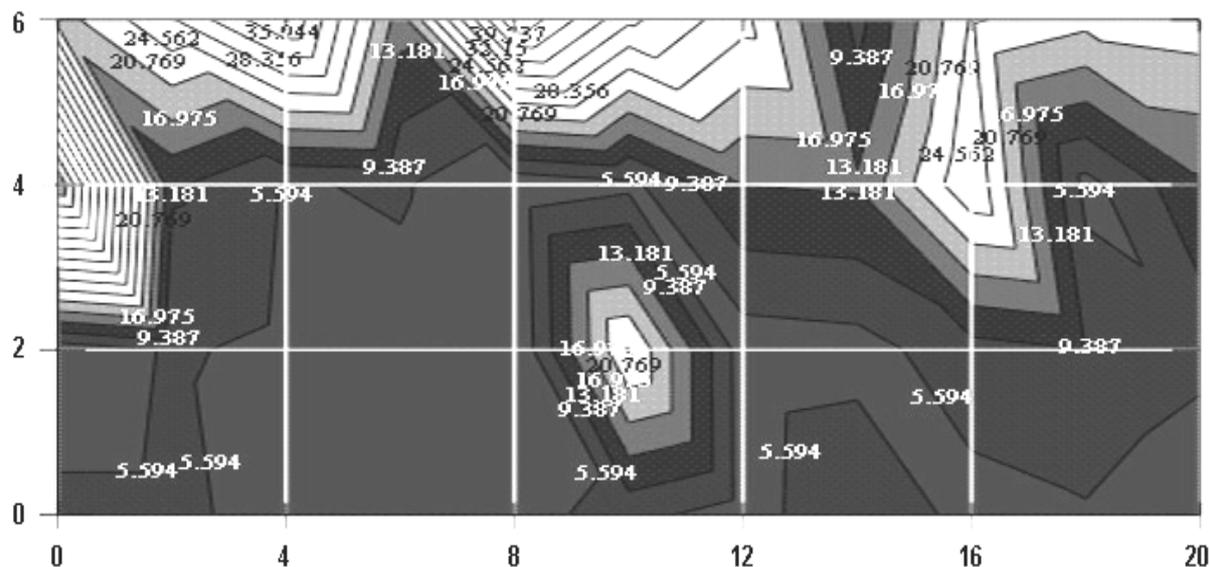
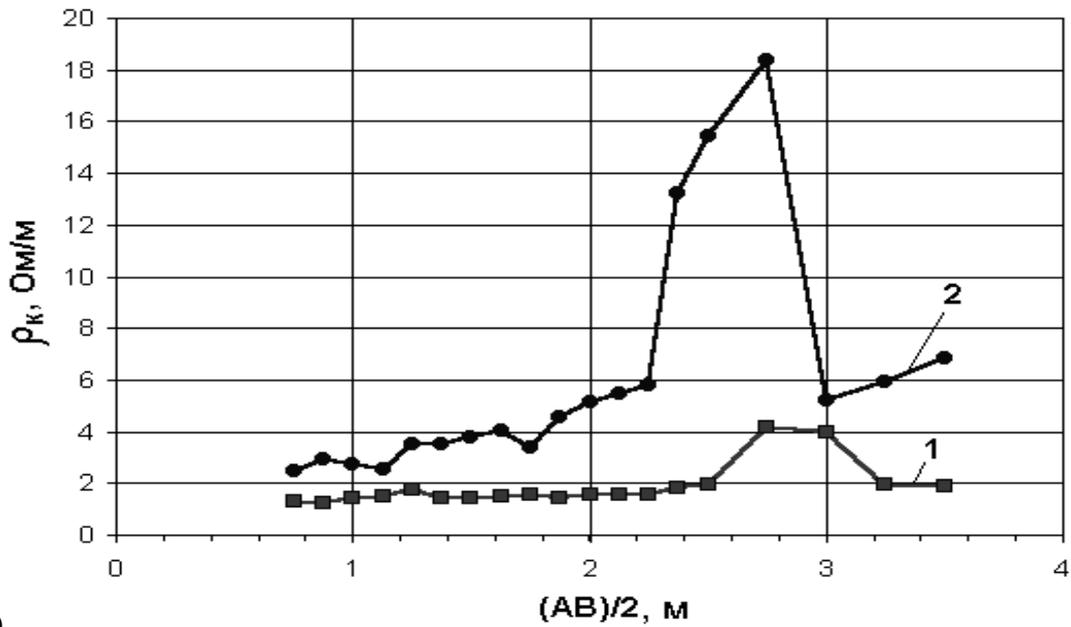


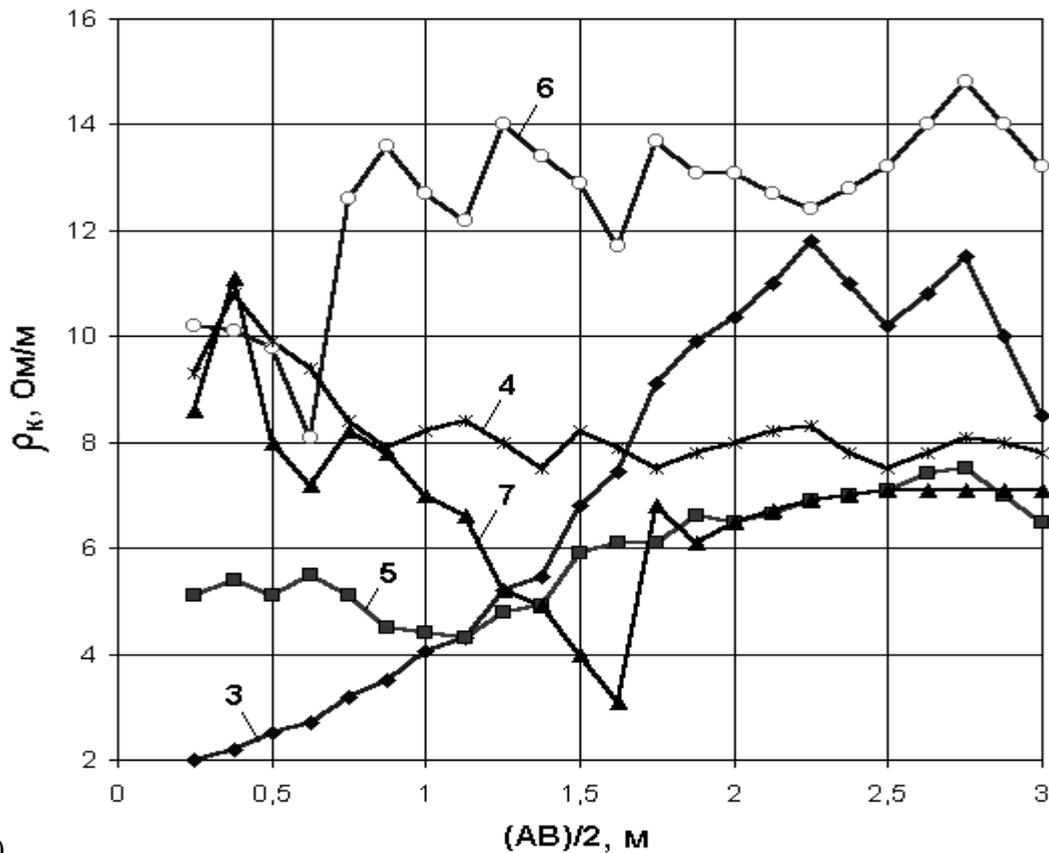
Рис. 4 – Карта кажущегося электросопротивления грунтового и насыпного массивов вблизи опоры железнодорожного моста завода им. Петровского, г. Днепропетровск.

Трещиноватость разрывает сплошность массива, поэтому трещины выделяются резким изменением кажущегося электрического сопротивления, рис. 5. Глубина трещин относительно контура выработки остается постоянной, поэтому при возрастании нагрузок увеличивается расслоение и изменяется величина электросопротивления, но не изменяется местоположение трещин, рис. 5 а. Величина электросопротивления резко возрастает в кровле выработок, что свидетельствует о наличии интенсивных процессов расслоения массива пород, рис. 5 б. При прохождении выработок по подработанным и нарушенным породам на графиках изменения электросопротивления отмечаются многочисленные перепады (пики), которые вызваны повышенной трещиноватостью массива, однако расположение зон повышенных и пониженных напряжений остается постоянным. Проведенные исследования позволили установить высокую степень информативности и надежности электрометрического метода.

С точки зрения безопасности и охраны шахты в целом, предупреждения внезапного прорыва шахтных вод (такие прорывы произошли, например, на рудниках №1 и №2 ГГХП «Полиминерал», г. Стебник, когда были полностью затоплены целые рабочие горизонты, на СУБРе (Россия), когда была полностью затоплена целая шахта) наиболее важными параметрами являются объемы воды, которые содержатся в водоносных горизонтах, пустотах, трещиноватых зонах, подземных или наземных водохранилищах, реках, озерах, водоотодах и т.д., а также водопропускная способность соединяющихся водопроницаемых полостей. Метод конечных элементов позволяет на основе методов частичного



а)



б)

1 – почва выработки в зоне среднего давления (ПК-85); 2 – почва выработки в зоне большого давления (ПК-92, развилка выработок); 3 – почва выработки вблизи развилки; 4 – кровля; 5 – бок со стороны массива; 6 – бок со стороны развилки; 7 – верхний угол со стороны развилки (3, 4, 5, 6, 7 – ВЭЗ в одном сечении выработки)

Рис. 5 – Исследование трещиноватости массива горных пород методом вертикального электрометрического зондирования пород квершлага № 600 (ПО «Полиминерал»), пройденного комбайном

и избыточного нагружений, а также метода последовательных итераций установить последовательные первичные разрушения элементов, т.е. зоны образования будущих водопроводящих трещин и щелей. В образовании первичных трещин доминирующую роль играют механические напряжения, так как механические нагрузки (возмущения) распространяются со скоростью упругих волн, а фильтрационные напряжения (суффозия, выпор) ввиду преобладающей линейности процессов фильтрации (просачивания) в грунте или породе (турбулентное движение воды возможно только в условиях свободного движения), - изменяются монотонно и непрерывно и только ускоряют процесс разрушения. Поэтому изначально фильтрационные процессы менее динамичны, чем процессы сдвигения и обрушения пород, тем более газодинамические процессы. Кроме того, на фильтрационные процессы накладываются инерционные процессы размокания и разрыхления пород, которые не однозначны по отношению к развитию фильтрации.

Поскольку в осадочных горных породах явление фильтрации возникает лишь тогда, когда величина градиента напора превышает начальный градиент, то решение фильтрационной задачи с применением математического аппарата метода конечных элементов целесообразно выполнять в два этапа: сначала определить зоны разрушения элементов, а затем произвести расчет возможных узловых притоков, напоров и водопритоков в горные выработки.

Анализ зон разрушения позволяет оценить пути фильтрации водных потоков и объемы возможных водопритоков, включая объемы водоносных пластов и зон накопления воды. Объемы воды легко вычислить по суммарной площади разрушенных элементов и по среднему для зоны коэффициенту разрыхления или объемной пористости горных пород. Будем считать, что зоны разрушения состоят из элементов, вышедших по результатам расчётов в неупругое состояние. Каковы бы ни были три точки, площадь треугольника ABC с координатами $A(x_1, y_1)$, $A(x_2, y_2)$, $A(x_3, y_3)$ вычисляется по формуле [7]:

$$S_1 = \left| \frac{1}{2} [(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1)] \right| \quad (6)$$

Площадь зоны равна сумме площадей разрушенных треугольников:

$$S_\zeta = \sum_{i=1}^n |S_i| \quad (7)$$

Если произвести расчеты зон разрушений нескольких сечений, то предполагаемый объем накопления воды равен произведению объема зоны фильтрации на коэффициент, характеризующий величину открытой пористости и трещиноватости:

$$V_{\dot{a}} = V_\zeta K_{\ddot{u}} = \frac{\sum_{i=1}^n |S_i| + 2 \sum_{i=1}^m |S_i| + \dots + \sum_{i=1}^k |S_i|}{2} \times L_\zeta K_{\ddot{u}} \quad (8)$$

где V_a и V_c - объемы воды и водонасыщенной зоны; K_{on} - коэффициент открытой пористости; L_c - длина зоны. Следует отметить, что количество разрушенных элементов в зонах по сечениям в общем виде будет различно и новая нумерация может не совпадать с изначальной нумерацией элементов.

В соответствии с полученными результатами по определению зон разуплотнения и разрушения породного массива фильтрационные потоки рассчитываются по известным формулам фильтрации жидкости [8] и руководству [9].

Таким образом, постановка гидрогеомеханической задачи сводится к установлению исходных параметров фильтрации и напряженного состояния породного массива в следующем порядке: определяются физико-механические и фильтрационные свойства породы, структура фильтрационных потоков и их параметры, граничные условия в потоках подземных вод; разрабатывается расчетная схема и принимается геомеханическая модель породного массива с учетом гидрогеологии участка; выполняются расчеты напряженно-деформированного состояния породного массива. В результате решения определяются зоны разрушения массива, параметры водопроводящих трещин и их распространенность, зоны повышенных сжимающих напряжений, смещения и деформации массива пород [10, 11]. В зависимости от поставленной задачи производится прогноз ожидаемых водопритоков и устойчивости горнотехнических сооружений, разрабатываются технологические мероприятия по предупреждению негативных проявлений и определяются наиболее опасные участки для установки датчиков геофизического мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Советский энциклопедический словарь. - М.: Советская энциклопедия, 1983. - 1600 с.
2. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. - М: «Наука», 1977. - 664 с.
3. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. - М.: Недра, 1987. - 221 с.
4. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. - Л.: Недра, 1989. - 488 с.
5. Глушко В.Т., Виноградов В.В. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. - М.: Недра, 1982. - 189 с.
6. Руководство по геофизической диагностике состояния системы "крепь - породный массив" вертикальных стволов: Дополнение к «Пособию по восстановлению крепи и армировки вертикальных стволов. РД 12.18.073-88» / А.Ф. Булат, Б.М. Усаченко, А.А. Яланский и др.: Донецк: ООО "Лебедь", 1999. - 42 с.
7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. - М.: Наука, 1984. - 832 с.
8. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Основы гидрогеомеханики. - М.: Недра, 1974. - 296 с.
9. Руководство по расчетам фильтрационной прочности плотин из грунтовых материалов. - Л.: ВНИИГ, 1976. - 80 с.
10. Слащёва Е.А. К методике учета гидрогеологических факторов при решении геомеханических задач устойчивости породного массива // Геотехническая механика. - Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 1997. - № 3. - С. 167-170.
11. Слащёва Е.А. Особенности ввода и обработки исходной информации при решении геомеханических задач с помощью персональных ЭВМ // Геотехническая механика. - Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2004. - № 51. - С. 296-304.