

Взаимосвязь параметров нарушения геологической среды с изменением уровня подземных вод в результате ведения горных работ

О. А. Bubnova /Cand. Sci. (Tech.)/

M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics
under the NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine

Interrelation of the parameters of the disturbance of the geological environment with the change in the groundwater level as a result of mining operations

Цель. Установление взаимосвязи параметров нарушения геологической среды с изменением уровня подземных вод в районах ведения горных работ.

Методика. Выполнено математическое моделирование изменения уровня подземных вод с проверкой моделей на данных натурных наблюдений.

Результаты. В статье приведены математические модели, позволяющие рассчитать подъем уровня подземных вод и радиус депрессионной воронки, образующихся в результате ведения горных работ. Предложенный математический аппарат подтвержден натурными наблюдениями.

Научная новизна. Установлена взаимосвязь между параметрами нарушения геологической среды в результате ведения горных работ и изменением уровня подземных вод в регионе.

Практическая значимость. Предложенные математические модели позволяют установить высоту подъема уровня подземных вод и радиус депрессионной воронки от ведения горных работ на любой заданный момент времени, что позволяет осуществлять прогноз. (Ил. 2. Библиогр. 5 назв.)

Ключевые слова: нарушение геологической среды, подъем уровня подземных вод, депрессионная воронка, оседание.

Актуальность. Нарушение геологической среды в результате ведения горных работ приводит к формированию техногенного гидрогеологического режима. При этом на одних территориях наблюдается повышение уровня подземных вод, а на других, наоборот, понижение с образованием депрессионной воронки.

Практически во всех горнодобывающих регионах отмечается подтопление прилегающих к шахтным полям и подработанных территорий [1–3].

В тоже время параллельно существует другая, противоположная, проблема, которая заключается в чрезмерной сдвинутости водоносных горизонтов с образованием депрессионных воронок и дополнительном оседании пород в их пределах [4].

На основании изучения и анализа факторов, непосредственно влияющих на режим подземных вод, в работе [5] установлено, что самым значимым из них является нарушение геологической среды.

Таким образом, установление взаимосвязи параметров нарушения геологической среды с изменением уровня подземных вод в результате ведения горных работ является актуальным.

Математическая модель поднятия уровня подземных вод при нарушении геологической среды. Предположим, что площадь распространения потока равна S , суммарная мощность водовмещающих пород – m , а площадь нарушенной горными работами геологической среды – $S_{нар}$. При этом нарушенная геологическая среда изменила свои свойства и параметры, то есть в связи с уплотнением водовмещающих пород изменились их мощность, пористость и, соответственно, коэффициент фильтрации и градиент напора. Указанные свойства влияют на режим подземных вод [5].

В пределах области S скорость фильтрации непрерывна, не изменяется при изменении гидростатического напора, водоносные пласты постоянно заполнены водой, и принимается в статическом состоянии.

Затем в этой области в каждый момент времени Δt происходит нарушение геологической среды на величину ΔS , т. е. со скоростью $\frac{\Delta S}{\Delta t}$, или $\frac{dS}{dt}$; т. к. процесс происходит непрерывно. Оно проявляется в том, что из геологической среды вытесняется вода и заменяется водонепроницаемыми породами с плотностью большей, чем вода. Происходит нарушение равновесного состояния водной среды в рассматриваемой области. Поскольку скорость фильтрации остается неизменной, то равновесие водной среды в рассматриваемой области достигается тем, что увеличивается мощность m_s водовмещающих пород на величину Δh , со скоростью $\frac{dh}{dt}$. Этот процесс происходит непрерывно в соответствии с разрушением геологической среды.

Равновесное состояние подземных вод достигается при условии

$$S_0 m_0 = \left(s_0 - \frac{dS}{dt} dt \right) \cdot \left(m_0 + \frac{dh}{dt} dt \right), \quad (1)$$

где S_0 – исследуемая общая площадь ненарушенных земель в момент времени, принятая за точку отсчета (первоначальная площадь земель, в которых состояние водной среды не нарушено горными работами); m_0 – первоначальная мощность водовмещающих пород; $\frac{dS}{dt}$ – скорость нарушения естественной геологической среды под влиянием горных работ; $\frac{dh}{dt}$ – скорость увеличения мощности водовмещающих пород в результате ведения горных работ.

Путем ряда преобразований выражения (1) получаем выражение, характеризующее скорость увеличения толщи водовмещающих пород в зависимости от скорости нарушения геологической среды в результате ведения горных работ (4):

$$\frac{dh}{dt} = \frac{m_0 \frac{dS}{dt}}{S_0 - \frac{dS}{dt} dt}. \quad (2)$$

Тогда величина повышения уровня грунтовых вод будет равна:

$$h = \int_0^T \frac{m_0 \frac{dS}{dt}}{S_0 - \frac{dS}{dt} dt} dt. \quad (3)$$

Принимаем, что скорость нарушения геологической среды равна v_n в единицу времени (например, год), является величиной постоянной и свойственной только для условий разработки конкретного месторождения. Тогда скорость

подъема уровня подземных вод $v_{n.в.}$ за период эксплуатации месторождения T составит:

$$v_{n.в.} = \frac{v_n \cdot m_0}{S_0 - v_n \cdot T}. \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) уровень подъема подземных вод на конкретный (выбранный) момент времени можно определить по выражению:

$$h = \frac{S_{нар} \cdot m_0}{S_0 - S_{нар}}, \text{ м}, \quad (5)$$

где h – величина поднятия уровня подземных вод; $S_{нар}$ – площадь, нарушенная горными работами, м^2 ; S_0 – площадь рассматриваемого региона, м^2 .

Геологическая среда региона состоит (по площади) из ненарушенной (естественной), ранее нарушенной и разрушаемой с определенной скоростью в процессе ведения горных работ площадей. Тогда прогнозируемый уровень поднятия подземных вод по отношению к исходному составит:

$$h_{пр} = \frac{(S_{нар} + v_n \cdot T) \cdot m_0}{S_0 - (S_{нар} + v_n \cdot T)}. \quad (6)$$

Проверка математической модели поднятия уровня подземных вод на данных режимных наблюдений. Наиболее актуален вопрос подтопления для городов Марганец и Покров (быв. Орджоникидзе), в непосредственной близости от которых добывают марганцевые руды Никопольско-Марганцевого месторождения Марганецкий и Покровский (быв. Орджоникидзевский) ГОК.

На разрабатываемой площади Никопольско-Марганцевого месторождения горные работы ведутся как подземным, так и открытым способом. Разработки в регионе продолжают более 130 лет. В настоящее время эксплуатируется 8 карьеров и 4 шахты. На ПГОК и МГОК создана режимная сеть, густота которой позволяет выявить все основные закономерности изменения режима подземных вод.

В ряде районов городов Марганец и Покров, а также на территориях самих ГОК на протяжении более 20 лет фиксируется подъем уровня подземных вод. На территории города Марганец уровень грунтовых вод повысился на 0,19–3,90 м (средний 2,0 м), а на территории города Покров и промплощадках ОГОК – на 2,13–4,0 м (средний 3,0 м). При этом есть территории, где повышение уровня подземных вод достигает 7,0 м. В некоторых местах грунтовые воды подходят близко к поверхности, что создает эффект заболачивания и подтопления.

Подъем уровня подземных вод происходит на обширной территории и не может быть вы-

зван только за счет потерь воды из гидротехнических и инженерных сооружений.

В соответствии с предложенной математической моделью поднятие уровня подземных вод и, как следствие, подтопление населенных пунктов происходит из-за преграждения естественного движения вод нарушенными горными работами территориями. Объем воды остается тот же, но площадь его распространения уменьшается; изменяется направление движения подземных вод – они обтекают преграду. Для выполнения расчетов произведено оконтуривание территорий горнодобывающих регионов границей поступления подземных вод, расположенной перед горнодобывающими объектами, и границей их разгрузки. Территории ПГОК и МГОК, оконтуренные этой границей, состоят из площадей с ненарушенной и нарушенной карьерами, шахтами и другими горными объектами геологической средой. Причем соотношение нарушенных и ненарушенных площадей весьма существенное. Оценка влияния разрушенной геологической среды на величину поднятия уровня грунтовых вод произведена исходя из следующих фактических данных по предприятиям:

- средняя мощность водовмещающих пород по ПГОК составляет 10,5 м, а по МГОК – 4,0 м;
- общая площадь нарушенных земель по ПГОК и МГОК – соответственно, 54 и 40 тыс. м², а регионов – 256 и 124 тыс. м².

Величины поднятия уровня подземных вод для городов Марганец и Покров, рассчитанные по выражению (6), составляют, соответственно, 1,9 м и 2,8 м.

Как видим, определенные аналитически величины поднятия уровня подземных вод близки фактическим значениям, что подтверждает справедливость теоретических предпосылок и эффективность предложенного математического аппарата по определению поднятия уровня подземных вод в регионах, значительно нарушенных горными работами.

Математическая модель определения параметров депрессионной воронки в зависимости от площади нарушения геологической среды. Радиус депрессионной воронки определяется на практике по результатам режимных наблюдений, а прогнозные значения устанавливаются расчетом в соответствии с положениями СНиП 2.06.14-85. Однако эти методы не позволяют достаточно точно определить область депрессии.

Автором для определения радиуса депрессионной воронки предлагается следующая модель.

Принимаем шахту (группу шахт) за совершенную скважину, которая вскрывает один од-

нородный водоносный горизонт (несколько горизонтов, но в расчетах принимаются как один однородный горизонт, а все качественные его характеристики как средневзвешенные по всем водоносным горизонтам).

Расчет радиуса депрессионной воронки произведен исходя из следующих соображений.

Исходной при расчете притока к совершенной скважине является закон Дарси:

$$Q = \frac{K_{\phi} \cdot F \cdot \Delta H}{L} = K_{\phi} \cdot F \cdot I, \quad (7)$$

где Q – расход воды или количество фильтрующей воды в единицу времени, м³/сут; K_{ϕ} – коэффициент фильтрации, м/сут; F – площадь поперечного сечения потока, м²; ΔH – разность напоров, м; L – длина пути фильтрации, м; I – градиент напора или пьезометрический уклон.

При этом для установления площади сечения потока принято: поверхность водоупора – за ось абсцисс, а ось скважины (центр шахты или карьера) – за ось ординат. Площадь сечения потока при этом равна боковой поверхности цилиндра:

$$F = \pi x m, \quad (8)$$

где m – мощность водоносного горизонта, м.

Напорный градиент I для сечения h , удаленного от скважины на расстояние x , равен:

$$I = -\frac{dh}{dx}. \quad (9)$$

Приток воды к скважине в процессе водопонижения получается путем подстановки в выражение (7) равенств (8) и (9):

$$Q = \pi k m x \frac{dH}{dx}. \quad (10)$$

После интегрирования выражения (10) в пределах сечения I и II (начало и конец депрессионной воронки) получается следующее выражение:

$$Q = \frac{\pi \cdot K_{\phi} \cdot m (H_2 - H_1)}{\ln x_2 - \ln x_1}, \quad (11)$$

где Q – суточный водоотлив по шахте, м³/сут; H_1 – высота уровня воды в начале депрессионной воронки (от нижнего разрабатываемого пласта до поверхности), м; H_2 – высота уровня воды в конце депрессионной воронки (на границе участков шахтного поля, где происходит сдвигание подработанного массива), м; K_{ϕ} – средний коэффициент фильтрации в породах четвертичных отложений и карбона, изменяется в период развития депрессионной воронки в соответствии с зонами деформаций сжатия и растяжения, м/сут.

Если приравнять $x_1 = r$ (радиус скважины, а в данном случае радиус нарушенных земель, т. е.

для шахты радиус мульды сдвижения) и $x_2=R$ (радиус депрессионной воронки), а $H_1=H_c$ и $H_2=H_0$, расход скважины выразится следующей формулой:

$$Q = \frac{\pi \cdot K_{\phi} \cdot m(H_0 - H_c)}{\ln R - \ln r}. \quad (12)$$

Учитывая то, что при ведении горных работ нарушается сразу несколько водоносных горизонтов (как напорных, так и безнапорных), к тому же водоносные горизонты вскрыты с поверхности сетью скважин, выражение (12) примет вид:

$$Q = \frac{\pi \cdot K_{\phi}(H_0 - H_c)}{\ln R - \ln r}. \quad (13)$$

Из выражения (13) определяется радиус депрессионной воронки:

$$R = r \cdot e^{\frac{\pi \cdot K_{\phi}(H_0 - H_c)}{Q}}. \quad (14)$$

Проверка математической модели определения параметров депрессионной воронки в зависимости от параметров нарушения геологической среды. По предложенной математической модели для условий ш. «Степная» ДТЭК «Павлоградуголь» определено изменение параметров депрессионной воронки исходя из аналитического выражения (14), и полученные результаты сравнены с фактическими.

Следует остановиться на двух особенностях расположения шахтного поля ш. «Степная». Первая заключается в том, что она расположена севернее крупноамплитудного сброса, и поэтому горные разработки производят на большей глубине, чем шахты, которые расположены южнее.

Вторая особенность состоит в том, что шахтное поле ш. «Степная» находится на основном направлении движения подземных вод (бучак-

ского водоносного горизонта). Поэтому водопритоки в эту шахту значительные (914 м³/ч). В этой связи на земной поверхности шахтного поля ш. «Степная» образовались мульды сдвижения от выемки угля и обезвоживания массива (рис. 1), а также депрессионная воронка.

В связи с ликвидацией шахтного участка «Першотравнева» Приднепровской гидрогеологической партией предприятия «Южукргеология» были выполнены гидрогеологические исследования с построением развития депрессионной воронки по годам эксплуатации шахт «Степная» и «Першотравнева».

Для установления достоверности изложенной математической модели определения параметров депрессионной воронки в зависимости от параметров подработанного массива горных пород (мульды сдвижения) проведены расчеты. При этом использовались такие данные:

- а) количество водопритоков за рассматриваемый период;
- б) развитие мульды сдвижения (размеры нарушенных земель) за этот же период.

По результатам фактически наблюдаемых и расчетных значений радиусов депрессии, построен график (рис. 2).

Исходя из сравнения радиусов депрессионных воронок расчетных и определенных по гидрогеологическим данным со стороны восстания и падения (рис. 2) можно отметить следующее:

- а) расчетная величина депрессионной воронки меньше;
- б) максимальной величины радиусы депрессионной воронки расчетный и фактический достигают в разные периоды;
- в) фактическая величина депрессионной воронки увеличивается до 1990 г., а затем уменьшается.

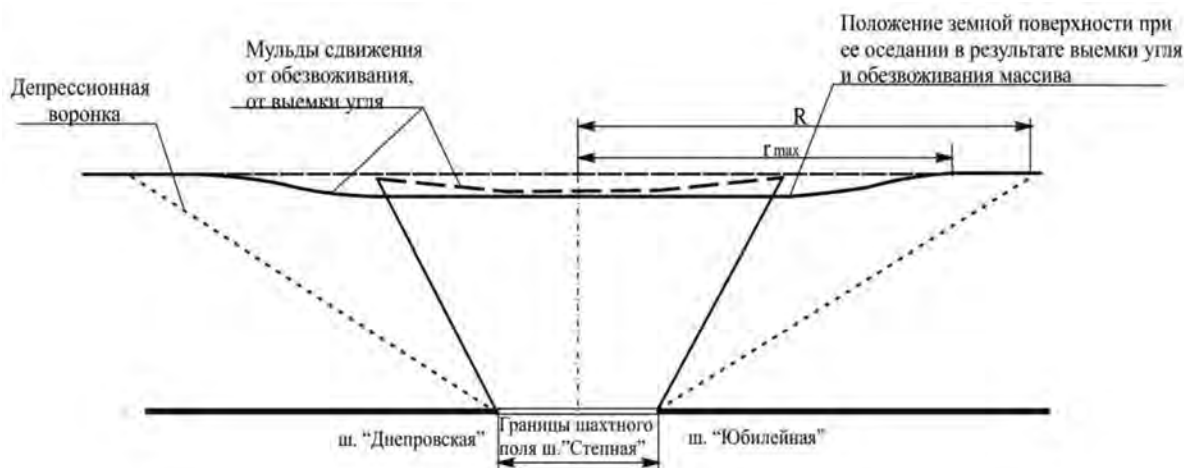


Рис. 1. Образование мульды сдвижения от выемки полезного ископаемого и обезвоживания подработанного массива



Рис. 2. Радиусы депрессионной воронки для условий ш. «Степная»

Смещения максимума радиуса депрессионной воронки между расчетной и фактической составляют 5-8 лет (рис. 2). Это свидетельствует о том, что если нарушен горный массив, то последствия его проявятся через несколько лет. Это позволяет рассмотреть возможность определения скорости фильтрации подземных вод. Кроме того, в расчетной формуле определения радиуса депрессионной воронки, исходя из площади нарушенных земель, необходимо ввести параметры, учитывающие «запаздывание» развития процесса.

Выводы. Образование и наличие в пределах естественной среды нарушенной и техногенной оказывает отрицательное влияние на естественные гидрогеологические условия, что проявляется в изменении области питания, движения и разгрузки подземных вод, образовании и деформировании достаточно больших по площади депрессионных воронок. В тоже время на прилегающих территориях наблюдается подъем уровня подземных вод. В статье приведены математические модели, позволяющие рассчитать подъем уровня подземных вод и радиус депрессионной воронки, образующихся в результате ведения горных работ. Предложенный математический аппарат подтвержден натурными наблюдениями.

Библиографический список / References

1. Вовк В. Т. Экология шахтерских регионов Украины / В. Т. Вовк, Е. В. Чепига // Уголь Украины. – 2015. – № 6. – С. 23–30.
Vovk, V. T. and Chepiga, Ye. V. (2015), "Ecology of miner regions of Ukraine", *Coal of Ukraine*, no. 6, pp. 23-30.
2. Бондаренко Л. В. Оценка геоэкологического состояния районов угледобычи Западного Донбасса / Л. В. Бондаренко, В. А. Кириченко,

С. А. Кравец // Проблемы природокористування, сталого розвитку та техногенної безпеки: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції; Дніпропетровськ, Україна, 06-09 жовтня 2014 р. / редкол.: А. Г. Шапар (голов. ред.) та ін. – Дніпропетровськ: Моноліт, 2014. – С. 22–24.

Bondarenko, L. V., Kirichenko, V. A. and Kravtts, S. A. (2014), "Assessment of the geoecological condition of the coal mining regions of the Western Donbass", *Problems of nature management, sustainable development and technogenic safety. Materials of the International Scientific and Practical Conference*, Dnipropetrovsk, Ukraine, October 06-09, 2014, pp. 22-24.

3. Четверик М. С. О причинах подтопления городов Марганец и Орджоникидзе / М. С. Четверик, Е. А. Бубнова // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. трудов. – Днепропетровск, 2004. – Вып. 48. – С. 171–176.

Chetverik, M. S. and Bubnova, Ye. A. (2004), "On the causes of flooding of the cities of Marganets and Ordzhonikidze", *Geo-Technical Mechanics*, no. 48, pp. 171-176.

4. Четверик М. С. Оседание земной поверхности при водопонижении и потопление территорий горнодобывающих регионов / М. С. Четверик, Е. А. Бубнова // Науково-технічний збірник. – Кривий Ріг: КТУ, 2004. – Вип. 86. – С. 31–36.

Chetverik, M. S. and Bubnova, Ye. A. (2004), "The subsidence of the earth's surface during dewatering and the sinking of the territories of mining regions", *Scientific and technical collection of KNU*, no. 86, pp. 31-36.

5. Бубнова Е. А. Влияние нарушенной и техногенной геологической среды на водный баланс территорий их расположения / Е. А. Бубнова // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. трудов. – Днепропетровск, 2016. – Вып. 129. – С. 136–145.

Bubnova, Ye. A. (2016), "Effect of disturbed and technogenic geological environment on water balance in areas of its location", *Geo-Technical Mechanics*, no.129, pp. 136-145.

Purpose is to study the establishment the relationship between the parameters of the disturbance of the geological environment and the level of groundwater in the mining areas.

Methodology. The mathematical modeling of the groundwater level change with the verification of models on the data of field observations was performed.

Findings. The article presents mathematical models that allow calculating the rise in the groundwater level and the radius of the depression funnel formed as a result of mining. The proposed mathematical apparatus is confirmed by field observations.

Originality. The relationship between the parameters of the disturbance of the geological environment as a result of mining and the change in the level of groundwater in the region is established.

Practical value. The proposed mathematical models allow to establish the height of the rise in the groundwater level and the radius of the depression funnel from mining at any given time, which allows for a forecast.

Key words: violation of the geological environment, growth of underground water level, depression crown, consideration.

Рекомендована к публикации

д. т. н. М. С. Четвериком

Поступила 30.05.2017



УДК 622.271:502.53.004.67

Производство

Е. В. Малеев

Институт геотехнической механики
им. Н. С. Полякова Национальной академии
наук Украины, г. Днепро, Украина
e-mail: maleev@i.ua

Направления развития горных работ по восстановлению ландшафта нарушенных территорий при открытой разработке горизонтальных месторождений

Ye. V. Malieiev

Institute of Geotechnical Mechanics
M. S. Polyakov NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine
e-mail: maleev@i.ua

Tendencies of the development of mining operations to rectore disturbed territories in terms of open-pit horizontal mining

Цель работы. Обоснование восстановления ландшафта и водообменных процессов в нарушенной геологической среде в процессе отвалообразования и рекультивации при открытой разработке горизонтальных и пологопадающих месторождений. Восстановление земель, пригодных для использования в сельском хозяйстве.

Методика. Установление взаимосвязи между направлениями перемещения фронта горных работ карьера и потоком поверхностных и подземных вод, возникающих в тальвегах балок; их влияние на эффективность технологических процессов открытой разработки.

Результаты. На основании взаимосвязи направления перемещения фронта горных работ карьера относительно потока поверхностных и подземных вод в тальвегах балок определено рациональное направление перемещения фронта горных работ, которое позволяет восстановить рельеф поверхности в виде, близком к природному.

Научная новизна. Впервые даны обоснования восстановления ландшафта и водообменных процессов в нарушенной геологической среде в процессе отвалообразования и рекультивации при открытой разработке горизонтальных и пологопадающих месторождений. Восстановление земель, пригодных для использования в сельском хозяйстве путем применения послойной горнотехнической и биологической рекультивации.

Практическая значимость. Обеспечение восстановления ландшафта и водообменных процессов в нарушенной геологической среде. Восстановление земель, пригодных для использования в сельском хозяйстве. (Ил. 6. Библиогр.: 9 назв.)

Ключевые слова: открытая разработка месторождений, ландшафт, водообменные процессы в геологической среде, отвалообразование, рекультивация.