

УДК 622.528.481

Г.Ф. Гаврюк, А.Г. Гаврюк

ОБЩИЙ МЕХАНИЗМ СДВИЖЕНИЯ ПОДРАБАТЫВАЕМОЙ ПОРОДНОЙ ТОЛЩИ ПРИ ВОДОПОНИЖЕНИИ

Розглянуто загальний механізм зрушення підроблюваної породної товщі, що складена осадовими відкладами, в умовах попереднього водозниження.

Рассмотрен общий механизм сдвижения подрабатываемой породной толщи, представленной осадочными отложениями, в условиях предварительного водопонижения.

The general mechanism of moving of the earned additionally pedigree layer, presented mountain siltages deposits is considered, in the conditions of preliminary decline of water level.

В существующих методиках расчета ожидаемых сдвижений и деформаций земной поверхности при подработках важнейшим показателем является величина максимального оседания земной поверхности, от определения которой в значительной степени зависит точность прогнозируемых сдвижений и деформаций.

Известно, что основное влияние на величину максимального оседания оказывают такие параметры, как размеры очистной выработки, глубина ведения горных работ, угол падения пласта полезного ископаемого, состав и физико-механические свойства пород, гидрогеологические условия подрабатываемого породного массива.

Горно-геологические условия Никопольского марганцевого месторождения, где проводились настоящие исследования, следующие:

- глубина разработки – от 60 до 100 м;
- вынимаемая мощность марганцеворудного пласта – от 1,6 до 3,1 м;
- залегание пласта – почти горизонтальное;
- породы, слагающие подрабатываемую толщу – наносы (различные глины, пески, суглинки, известняки и т.п.);
- система разработки – столбовая (отработка выемочных столбов осуществлялась лавами и комплексно-механизированными заходками).

Следует при этом отметить, что ведение очистных горных работ на месторождении осложнено наличием в толще горных пород водоносных горизонтов (как безнапорных, так и напорных), являющихся источниками обводнения горных выработок, поэтому для предотвращения прорывов воды в горные выработки на шахтах проводится предварительное водопонижение.

Натурними инструментальними наблюдениями, проведенными сотрудниками кафедры маркшейдерии НГУ на шахтах Марганецкого ГОКа на наблюдательных станциях (территории полей шахт №№ 4-7 и 9-10), было установлено значительное превышение величин максимальных оседаний земной поверхности по отношению к вынимаемой мощности марганцеворудного пласта (до 1 м и более).

На территории Грушевско-Басанского участка Никопольского марганцевого месторождения выделены несколько водоносных горизонтов, оказывающих отрицательное влияние на ведение подземных горных работ, при этом основным является надрудный нижнесарматский водоносный горизонт. Этот горизонт напорный и представлен мелкозернистыми песками мощностью 3-4 м, местами до 10 м. Водоносные пески отделены от рудного пласта глинами мощностью от 5 до 20 м. Питание горизонта осуществляется на большой площади, выходящей далеко за пределы участка.

Водопритоки из нижнесарматского водоносного горизонта на шахтах Марганецкого ГОКа колеблются в широких пределах – от 5,5 до 70 м³/ч.

Столбы воды в период разведки месторождения на различных участках шахтных полей были весьма различны и составляли в среднем 8-15 м (рис. 1). Наличие такого количества воды в толще горных пород являлось значительным препятствием при разработке месторождения. Предварительное снижение пьезометрических уровней в нижнесарматском водоносном горизонте выполнялось при помощи восстающих скважин, пробуренных из подготовительных горных выработок.

Как отмечают авторы статьи [1], практически очистные горные работы безопасно проводить при остаточных столбах воды в надрудном водоносном горизонте до 2 м.

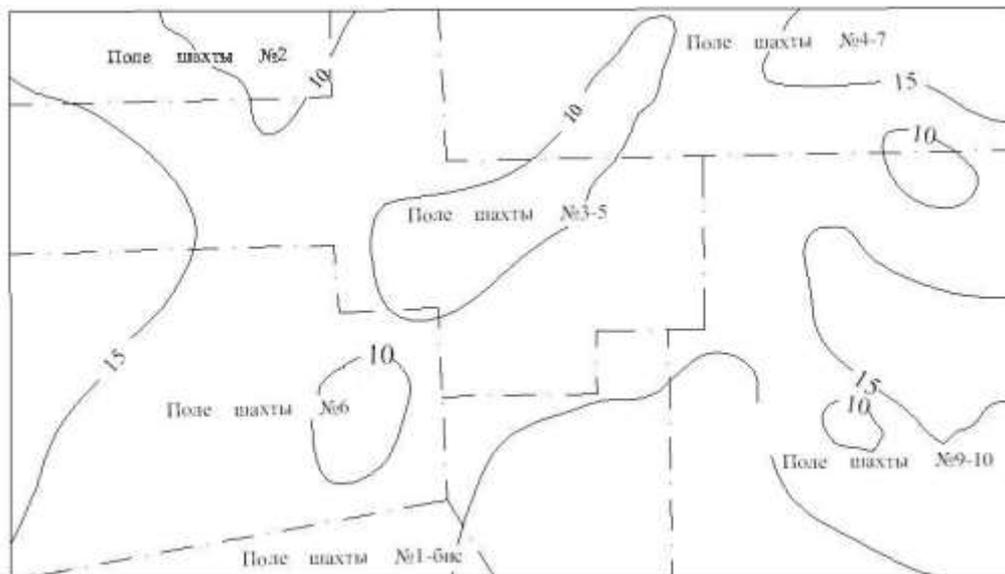


Рис. 1. Схема изостолбов воды в нижнесарматском водоносном горизонте Грушевско-Басанского участка на момент его разведки

Наблюдения за изменениями уровней подземных вод в процессе разработки марганцеворудного пласта выполнялись гидрогеологической службой комбината на гидронаблюдательных скважинах, пробуренных на земной поверхности до водоносного горизонта. Из представленных выше общих сведений о гидрогеологических особенностях месторождения становится очевидной важность и актуальность проблемы водопонижения при разработке марганцеворудного пласта и учета данного явления при прогнозировании сдвижений подрабатываемых массивов.

Целью настоящей работы является попытка объяснения общего механизма сдвижения горных пород при водопонижении с учетом прочностных характеристик подрабатываемого

породного массива для прогнозирования сдвижений земной поверхности. В целом, несмотря на достаточную ясность механизма деформирования, надежный прогноз рассматриваемого явления представляется задачей весьма сложной. Это обусловлено как трудностями принципиального характера, связанными с необходимостью учета двух стадий консолидации – первичной (фильтрационной) и вторичной (стадией ползучести), так и техническими трудностями проведения инструментальных наблюдений. При частом переслаивании песчано-глинистых пород фильтрационной стадией консолидации можно пренебречь, тогда осадка концентрируется только процессами ползучести. Значительно большие трудности связаны с прогнозом фильтрационной стадии консолидации, когда процесс осадки контролируется фильтрационными свойствами пород – скоростью рассеивания порового давления. При изучении явления сдвижения толщи горных пород под влиянием глубокого водопонижения на Яковлевском и Южно-Белозерском месторождениях [2-3] оказалось, что заметное сжатие толщи горных пород в процессе мощного строительного водопонижения началось после того, как понижение в центре депрессионной воронки достигло величин порядка 50-60 м. Таким образом, породы, подверженные сжатию, обладали значительным сцеплением упрочнения, которое нарушалось лишь при дополнительных нагрузках порядка 5-6 кгс/см². На основании данных опытных откачек было установлено, что у некоторых пород сцепление нарушалось лишь при нагрузках 0,5-0,7 кгс/см².

На Никопольском марганцевом месторождении при понижении уровней напорных вод инструментальными наблюдениями было установлено, что на тех участках, где очистные горные работы еще не проводились, а величина водопонижения составляла около 5-7 м, процесс консолидации песчано-глинистых отложений происходил довольно медленно. Величины оседаний земной поверхности в центре депрессионной воронки составляли около 15-30 мм за год. Края мульды сдвижения при этом не были четко выражены, о чем свидетельствовали результаты нивелировок, а по реперам, находящимся на расстоянии 100-150 м от водопонижающих устройств, оседания вообще не были зафиксированы. Известно, что напорный водоносный горизонт в естественном состоянии находится под воздействием объемных и поверхностных сил в напряженном состоянии. Напряжение, действующее на площадь контактов водоносного горизонта и перекрывающего его водоупорного слоя, под влиянием этих сил уравнивается реакцией минерального скелета водовмещающих пород и гидростатическим давлением. Равновесие этих сил можно записать в следующем виде [4]:

$$P_e + P_o = P_u + vP_z, \quad (1)$$

где P_e – внешняя сила, численно равная весу выше-лежащих пород с заключенной в них жидкостью (геостатическое или горное давление); P_o – внешние поверхностные и объемные природные и искусственные силы (атмосферное давление, океанические и земные приливы, динамические и статические нагрузки); P_u – интергранулярное давление; P_z – поровое (гидростатическое) давление водоносного пласта; v – безразмерный коэффициент (для водоносного горизонта, состоящего из слабосцементированного песчаника или песка, равен единице).

Гидростатическое давление, так как оно не изменяет силу взаимодействия минеральных частиц водовмещающей породы принято считать нейтральным напряжением σ_n .

Интергранулярное давление P_u , оказывающее влияние на силу сжатия скелета породы, создает эффективное напряжение σ_3 . Сумма объемных и поверхностных сил P_o , действующих на единичную горизонтальную площадку кровли водоносного пласта, создает полное напряжение σ_n . Из равенства (1) имеем:

$$\sigma_n = \sigma_3 + v \sigma_n, \text{ при } v = 1, \sigma_3 = \sigma_n - \sigma_n. \quad (2)$$

Естественное нормальное эффективное напряжение, согласно (2), в случае пренебрежения величиной внешних сил P_o , численно равно весу вышележащих пород с заключенной в них жидкостью за минусом порового (гидростатического) давления P_z .

Геостатическое давление, равное весу перекрывающей водоносный горизонт породной толщи, определяется из [4]:

$$P_6 = q \sum \rho \Delta h,$$

где q – ускорение силы тяжести; ρ – объемная плотность водонасыщенной породы в слое мощностью Δh .

Гидростатическое давление столба воды H в скважине выражается соотношением

$$P_2 = \rho_w q H.$$

Согласно уравнению (1) нейтральное напряжение так же, как эффективное, является функцией геостатического давления.

Любое колебание гидростатического давления водоносного пласта вызовет изменение естественного эффективного напряжения. Геостатическое напряжение можно считать величиной постоянной. Тогда из уравнения (2) следует:

$$d \sigma_3 = - d \sigma_n.$$

Следовательно, уменьшение гидростатического давления, происходящее в результате водопонижения, будет сопровождаться ростом естественного эффективного напряжения. При этом приращение эффективного напряжения будет численно равно величине убывания первоначального пьезометрического напора. Величина же нарушенного (результатирующего) напряжения σ_3' будет складываться из первоначального напряжения σ_3 и приращения его на данный момент $\Delta \sigma_3$:

$$\sigma_3' = \sigma_3 + \Delta \sigma_3.$$

Классическая теория упругого режима фильтрации базируется, как известно, на предположении о полной передаче “депрессионной нагрузки” на водоносные породы. Иначе говоря, принимается, что снижение напоров в какой-то точке кровли водоносного пласта на величину ΔH вызывает увеличение эффективного напряжения в этой точке.

$$\Delta \sigma_3 = \Delta H \gamma.$$

Практическое применение такого предположения при условии, что размеры депрессионной воронки значительно превышают суммарную мощность перекрывающих пород $\sum_{i=1}^n h_i$, не вызывает никакого сомнения. Очевидно, данное предположение приемлемо и для зон полных сдвижений породной толщи при ее подработке.

При проведении относительно кратковременных откачек из водоносных горизонтов, когда диаметр зоны откачки $2R$ соизмерим с величиной $\sum_{i=1}^n \Delta h_i$ или даже меньше ее, будет иметь существенное значение эффект “зависания” перекрывающей породной толщи: давление на водовмещающие породы (в пределах зоны влияния откачки) со стороны перекрывающих пород будет передаваться лишь частично – ввиду заземляющего действия боковых пород по контуру депрессионной воронки [5].

Инструментальные наблюдения на наблюдательных станциях подтверждают сделанные выше выводы. В обычных условиях водопонижения, когда уровни снижаются медленно, процесс консолидации пород в центре депрессионной воронки (в районе водопонижающих скважин) происходит довольно медленно и плавно, вызывая незначительные сдвиги земной поверхности (до 15-30 мм/год). Катализатором (ускорителем) этого процесса могут быть очистные горные работы, вызывающие бурное развитие процесса сдвига горных пород и земной поверхности и ликвидирующие эффект “зависания” в зоне полных сдвижений.

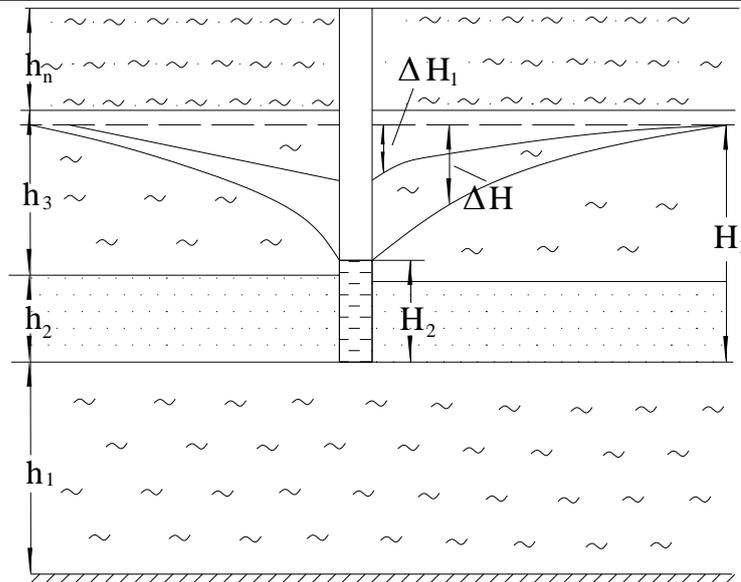


Рис. 2. Схема к расчету оседаний от водопонижения

Механизм сжатия пород в результате водопонижения, в принципе, достаточно очевиден: снижение напоров при практически неизменном общем давлении приводит к росту эффективных напряжений и уменьшению пористости пород. Если пренебречь изменением веса пород, отвечающим упругой водоотдаче, то можно считать, что снижение напоров на величину ΔH вызывает увеличение эффективных напряжений на величину:

$$\Delta\sigma_v = \Delta H \gamma,$$

где $\Delta H = H_1 - H_2$ – разность уровней воды в водоносном горизонте до и после водопонижения, м (рис. 2); γ_{\square} – плотность воды, Н/м³; H_1 – пьезометрический уровень воды в водоносном горизонте до начала водопонижения; H_2 – пьезометрический уровень воды в водоносном горизонте в процессе водопонижения; $\Delta H, \Delta H_1$ – величина снятия напора; h_1, h_2, h_3, h_n – мощности породных слоев.

Известно [6], что относительное сжатие единичного породного слоя может быть выражено через изменение его коэффициента пористости:

$$e = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{1 + \varepsilon_1}.$$

Из данного выражения выводится важнейшая зависимость механики грунтов для расчета осадки слоя породы мощностью h . Если ε_1 – начальный, а ε_2 – конечный коэффициент пористости, полученный после стабилизации осадки под заданной нагрузкой P , то конечная осадка будет равна:

$$B = eh = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{1 + \varepsilon_1} h.$$

Изменение коэффициента пористости $\varepsilon_1 - \varepsilon_2$ можно представить в виде:

$$\varepsilon_1 - \varepsilon_2 = a(P_2 - P_1),$$

где $P_2 - P_1$ – приращение нагрузки на слой, кгс/см²; a – коэффициент сжимаемости (уплотнения) породы для интервала нагрузок от P_1 до P_2 , см²/кг.

С учетом этого осадка слоя пород получается равной:

$$B = \frac{a(P_2 - P_1)}{1 + \varepsilon_1} h.$$

Приращение нагрузки $P_2 - P_1$ равно увеличению эффективных напряжений $\Delta\sigma$.

Формула для вычисления конечной осадки однородного слоя пород мощностью h при водопонижении будет равна:

$$B = \frac{a(H_1 - H_2)\gamma}{1 + \varepsilon} h .$$

Если толща неоднородная и представлена различными по физико-механическим свойствам и мощности породами, то в этом случае необходимо выполнять расчеты конечных осадок каждого из слоев:

$$B_1 = \frac{a_1 h_1}{1 + \varepsilon_1} (H_1 - H_2) \gamma ;$$

$$B_2 = \frac{a_2 h_2}{1 + \varepsilon_2} (H_1 - H_2) \gamma ;$$

$$B_n = \frac{a_n h_n}{1 + \varepsilon_n} (H_1 - H_2) \gamma ,$$

где a_1, a_2, a_n – коэффициенты сжимаемости каждого из слоев, см²/кг; $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_n$ – коэффициенты пористости слоев; h_1, h_2, h_n – вертикальные мощности слоев, м.

Тогда общая осадка всей сжимающейся породной толщи в условиях предварительного водопонижения равна:

$$\begin{aligned} B_{\kappa} &= B_1 + B_2 + \dots + B_n = \sum B_i = \\ &= (H_1 - H_2) \gamma \left(\frac{a_1 h_1}{1 + \varepsilon_1} + \frac{a_2 h_2}{1 + \varepsilon_2} + \dots + \frac{a_n h_n}{1 + \varepsilon_n} \right). \end{aligned}$$

Проведем следующую замену: $\frac{a_1}{1 + \varepsilon_1} = k_1$; $\frac{a_2}{1 + \varepsilon_2} = k_2$; ... $\frac{a_n}{1 + \varepsilon_n} = k_n$, где k_1, k_2, k_n – коэффициенты, учитывающие физико-механические свойства пород (сжимаемость и пористость). Тогда окончательное выражение для расчета общей осадки примет вид:

$$\begin{aligned} B_{\kappa} &= (H_1 - H_2) \gamma (k_1 h_1 + k_2 h_2 + \dots \\ &+ k_n h_n) = \Delta\sigma_s \sum_{i=1}^n k_i h_i. \end{aligned} \tag{3}$$

Таким образом, выражение (3) позволяет определять величины конечных осадок толщи горных пород с учетом их физико-механических свойств при известной величине водопонижения. Правомерность таких выводов была апробирована на шахтах Марганецкого ГОКа на наблюдательных станциях по профильным линиям реперов, заложенных на земной поверхности вдоль выемочных столбов в плоском дне мульды сдвижения. При этом были использованы данные лабораторных испытаний ВНИМИ (табл. 1) образцов физико-механических свойств горных пород Грушевско-Басанского участка [7].

Для выделения составляющей за счет водопонижения из общих максимальных оседаний земной поверхности были вычтены возможные максимальные оседания за счет влияния очистных горных работ по формуле:

$$\eta_{os} = \eta_{oo} - \eta_{oe} \quad \text{или} \quad \eta_{os} = \eta_{oo} - q_o m , \tag{4}$$

где η_{oo} – величины общих максимальных оседаний земной поверхности по результатам натурных инструментальных наблюдений на наблюдательной станции по профильной линии реперов в плоском дне мульды на момент окончания процесса сдвижения; q_o – относительная величина максимального оседания за счет ведения горных работ (для месторождений со слабыми вмещающими породами равно 0,9); m – вынимаемая мощность пласта, м.

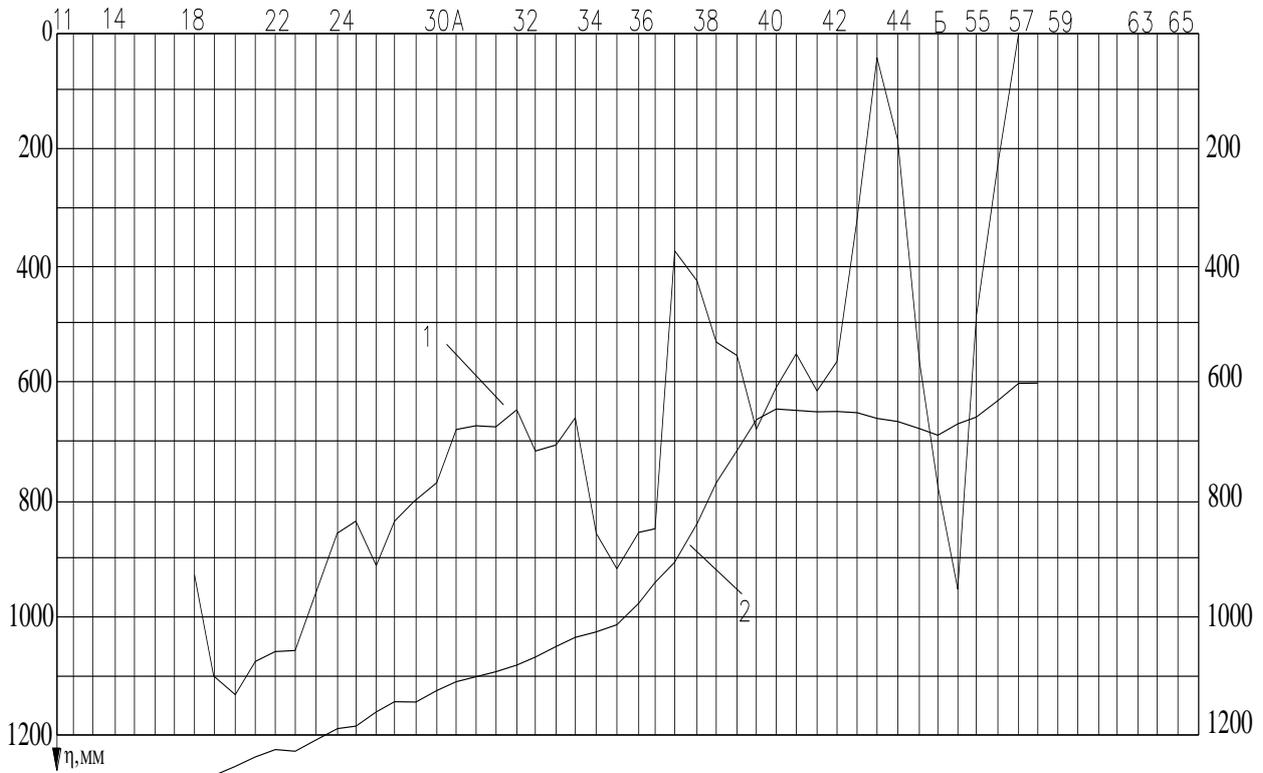


Рис. 3. Графики фактических величин оседаний (1) и расчетных (2) по наблюдательной станции № 4 (шахта № 9-10)

Для установления корреляционной зависимости величины максимальных оседаний за счет водопонижения $\eta_{ов}$, полученные из выражения (4), сопоставлялись с соответствующими расчетными значениями B_k , полученными по формуле (3) с учетом физико-механических свойств подработанного породного массива и величины водопонижения по гидрогеологическим скважинам [7].

Таблица 1

Показатели физико-механических свойств пород Грушевского-Басанского участка месторождения

Наименование пород	Средняя мощность слоя, h_i , м	Коэффициент пористости, ε_i	Коэффициент сжимаемости при нагрузке 1 кг/см^2 , a_i , $\text{см}^2/\text{кг}$	$k_i = \frac{a_i}{1 + \varepsilon_i}$, $\frac{\text{см}^2}{\text{кг}} \cdot 10^{-3}$	Средняя величина сжимаемости слоя, B_i , мм	$\frac{B_i}{B_k}$, %
Суглинки светлобурые, лессовидные	14,5	0,985	0,030	15,1	50-160	10
Глина красно-бурая, плотная	11,3	0,796	0,050	27,8	150-650	46-50
Глина темно-серая, плотная	4,6	0,871	0,0281	15,0	20-75	4
Известняк-ракушечник плотный	5,3	0,710	0,003	1,8	10-20	1
Глина мергелистая, серая, плотная	13,3	1,500	0,0116	4,6	90-140	10
Глина черная, плотная, водоносная	7,7	1,165	0,014	6,5	20-120	9
Песок желтовато-серый, мелкозернистый водо-носный	3,7	0,580	0,001	0,6	1-2	—
Глина яблочно-зеленая	11,4	1,040	0,014	6,9	80-140	10
Марганцевая руда	2,1	1,128	0,050	23,5	40-100	10
Песок темносерый, мелко-зернистый водоносный	11,0	0,978	0,001	0,5	1-2	—

В камеральную обработку были включены величины оседаний по 24 рабочим реперам по профильной линии №2 наблюдательной станции №2 и 43 реперам по профильной линии №1 наблюдательной станции №4 (рис. 3). Расстояние между рабочими реперами наблюдательных станций равнялось 10 м. Анализ факторов, влияющих на величины оседаний V_k , показал, что из пород, слагающих подработанную толщу, наиболее подвержены процессу сжимаемости красно-бурые глины, мощность которых весьма значительна (в среднем около 11 м). Величина сжимаемости этого породного слоя может достигать от 150 до 650 мм, при этом доля оседаний от сжимаемости красно-бурых глин может составлять от 46 до 50% от общего максимального оседания за счет водопонижения [7].

Анализ результатов выполненных исследований позволяет сформулировать следующие основные выводы. Дано объяснение общего механизма сдвижения подрабатываемой породной толщи, состоящей из рыхлых песчано-глинистых отложений, в условиях предварительного водопонижения. Процесс сдвижения земной поверхности, вызванный совместным влиянием очистных горных работ и водопонижения, имеет свои отличительные особенности и закономерности. Подрабатываемая породная толща при снижении уровней водоносных горизонтов подвергается дополнительным сдвигам и деформациям. При этом величины вертикальных сдвижений вследствие водопонижения могут быть весьма значительны (до 1 м и более). Наиболее подвержены сжатию красно-бурые глины, мощность которых на территории Грушевско-Басанского участка месторождения около 11 м. Величина сжимаемости этих пород может достигать 150-650 мм. Предложенные формулы по расчету вертикальных сдвижений земной поверхности при водопонижении хорошо согласуются с результатами натурных инструментальных измерений на наблюдательных станциях. Учет такого важного явления, как водопонижение, позволяет существенно повышать точность прогнозируемых сдвижений и деформаций земной поверхности при решении вопросов подработки различных объектов на месторождении и выборе эффективных мер их охраны.

Список литературы

1. Седенко М.В., Гребинченко Л.С. Гидрогеологические и инженерно-геологические условия строительства шахт в пределах Никопольского месторождения марганцевых руд // Вопросы инженерной геологии при проектировании, строительстве и эксплуатации подземных сооружений, шахт и карьеров. – Л., 1969. – Вып. 1. – С. 93-98.
2. Мироненко В.А., Сердюков Л.И. Об учете сжимаемости глинистых пород при откачках из напорных водоносных горизонтов // Разведка и охрана недр. – 1970. – № 11. – С. 51-55.
3. Верещагин Н.П. Исследование некоторых процессов и явлений, возникающих в массивах горных пород при водопонижении (на примере Яковлевского и Южно-Белозерского железорудных месторождений): Дисс. ... канд. геол.-мин. наук. – ВСЕГИНГЕО, 1975. – 164 с.
4. Волейшо В.О. Формирование напряженно-деформированного состояния горных пород при глубоком водопонижении // Исследование влияния горных разработок на подземные воды и массивы горных пород. – М., 1985. – С. 59-62. – Тр. ВСЕГИНГЕО.
5. Martin P., Louis C. Tassements consecutifs an rabatte-ment de nappe // Bull. Bur. rech. geol. et mini-eres. Sec. 3, 1978. – № 1. – С. 3-34.
6. Роза С.А. Расчет осадки сооружений электростанций. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 228 с.
7. Охременко И.Н., Гаврюк Г.Ф., Антипенко Г.А. Влияние физико-механических свойств горных пород на состояние подрабатываемой толщи в условиях водопонижения // Сб. науч. тр. НГУ. – Д., НГУ, 2005. – № 22. – С. 38-44.