

УДК 622.831

РАЗРАБОТКА ПРОГНОЗНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ НАД ГОРНЫМИ РАБОТАМИ

К. Ч. Кожогулов¹, Д. К. Таханов², А. К. Кожас²,
А. Ж. Имашев², М. Ж. Балпанова²

¹Институт геомеханики и освоения недр НАН Кыргызской Республики,
E-mail: ifmgr@yandex.ru, ул. Медерова, 98, 720052, г. Бишкек, Кыргызская Республика

²Карагандинский государственный технический университет,
E-mail: takhanov80@mail.ru, Бульвар Мира, 56, M00A1T8, г. Караганда, Республика Казахстан

Рассмотрены вопросы геомеханического обоснования методов оценки состояния земной поверхности при подработке. Предложен метод определения параметров сдвижения, позволяющий проанализировать влияние подземных очистных работ на состояние земной поверхности при разработке горизонтальных и пологопадающих участков залежей из однотипных и переслаивающихся горных пород с разными деформационными характеристиками. Приведены методики построения прогнозного профиля мульды сдвижения при однотипных и переслаивающихся горных породах.

Кривые линий скольжения, паспорт прочности, мульда сдвижения, свод естественного равновесия, коэффициент разрыхления пород, зона деформации, целик

DOI: 10.15372/FTPRI20200204

Прогноз оседания поверхности земли при подработке представляет актуальную проблему разработки полезных ископаемых, связанную с негативным воздействием процесса сдвижения на подрабатываемые здания, сооружения, инженерные коммуникации и природные объекты. Проблема стала наиболее важной в последнее десятилетие из-за вовлечения в повторную отработку оставленных запасов полезного ископаемого в опорных целиках, а также вследствие продолжающегося освоения месторождений, отрабатываемых камерно-столбовой системой, при которой потери полезного ископаемого достигают 20–30 %, а иногда и 40 % (месторождения Жезказган, Саяк, Жомарт).

В настоящее время на Жезказганском месторождении сложилась сложная геомеханическая обстановка: за 90-летний срок отработки запасов вынута около 240 млн м³ руды, причем основные объемы отрабатывались камерно-столбовой системой с поддержанием земной поверхности рудными целиками и накоплением пустот. Погашение накапливаемых пустот за счет обрушения налегающей толщи или закладки выработанного пространства не проводилось. Земная поверхность над выработанным пространством за время отработки плотно застроена.

Камерно-столбовая система разработки предполагает сохранение от обрушений налегающей толщи. Из различных форм проявления горного давления при отработке месторождений полезных ископаемых камерно-столбовой системой наиболее опасными

являются обрушения налегающей толщи пород, так как на поверхности расположены здания, промышленные сооружения и инженерные коммуникации. При длительной эксплуатации месторождений постоянно требуются реконструкция старых и строительство новых сооружений и коммуникаций, которые невозможно полностью расположить на неподработанной земной поверхности.

При подземной разработке месторождений полезных ископаемых происходит сдвижение земной поверхности, приводящее к изменению ее положения, которое за счет оседаний и горизонтальных сдвижений нарушает сохранность сооружений и инженерных коммуникаций. При строительстве строений в районах ведения горных работ учитывается ожидаемое оседание земной поверхности, что позволяет предотвратить или уменьшить затраты на реконструкцию или снос отдельных сооружений.

Возникает необходимость решения актуальной научно-технической проблемы — геомеханического обоснования методов оценки состояния налегающей толщи горных пород и охраны сооружений при подземной разработке.

Важная характеристика процесса сдвижения земной поверхности и горных пород под влиянием подземных разработок — максимальное оседание η_m . На его величину большое влияние оказывают мощность разрабатываемой залежи m , угол ее падения α , глубина разработки H , размеры выработки $L_{ов}$, физико-механические свойства горных пород, горно-геологические условия.

Наибольшее оседание η_m в условиях полной подработки обратно пропорционально $\sqrt{H}$, для аналитического описания такой зависимости предложены различные соотношения, одним из которых является следующая формула:

$$\eta_m = \frac{a}{a + \sqrt{\frac{H}{m}}} \cdot m, \quad (1)$$

где η_m — наибольшее оседание в условиях полной подработки, м; m , H — мощность разрабатываемого пласта и глубина разработки соответственно, м; $a = 25$ — постоянная величина для условий Донецкого бассейна [1].

Наибольшее оседание в условиях полной подработки связано с отношением $e = P / (mS)$, где P — площадь сечения мульды сдвижения по главному направлению, м²; m — вынимаемая мощность пласта, м; S — размеры выработанного пространства, м² [1].

Если принять $P = \eta_m L / 2$, где η_m — наибольшее оседание, а L — расстояние от точки с наибольшим оседанием до границы мульды, то $e = \eta_m L / (2mS)$, откуда $\eta_m = 2meS / L$.

В [2] указаны недостатки формулы (1), не учитывающей вид пород и размеры выработанного пространства, предложен способ определения η_m , основанный на постоянстве объемов мульды оседаний: $\eta_m = \eta_0 k_1 k_2$, где η_0 — вертикальная составляющая полного вектора сдвижения в условиях полной подработки, м; k_1 , k_2 — коэффициенты, позволяющие учитывать степень затухания сдвижения при неполной подработке как вкрест простирания k_1 , так и по простиранию пласта k_2 . Недостаток данного подхода заключается в том, что в природе нет постоянства объемов мульды оседания и они на разном расстоянии от выработки различаются.

В [3] для условий Карагандинского бассейна при первичной и неполной подработке по линии падения пласта предлагается формула

$$\eta_m = \frac{1.7m \cos \alpha}{2 + 1.55 \sqrt{\frac{H}{D}}},$$

D — размер выработки по линии падения пласта.

В [4] для тех же условий представлена иная формула:

$$\eta_m = \frac{2m \cos \alpha}{2 + \sqrt{\frac{H}{D}}}.$$

В процессе дальнейших исследований в [5] для условий Карагандинского бассейна получена эмпирическая формула

$$\eta_m = \frac{m \cos \alpha}{1 + \frac{a_1}{n_1}} \sqrt{n_2},$$

где a_1 — коэффициент, определяемый по специальной таблице или формуле

$$a_1 = \frac{m - \eta_0}{\eta_0} = \frac{1 - q_0}{q_0},$$

здесь q_0 — максимальное относительное оседание, равное η_0 / m ; η_0 — максимальное оседание при полной подработке, м; n_1, n_2 — коэффициенты подработанности соответственно по линии падения и простиранию пласта, $n_1 = KD_1 / H$, $n_2 = KD_2 / H$, где K — коэффициент, зависящий от горно-геологических условий бассейна и равный $0.5 \operatorname{tg} \psi_3$ (ψ_3 — угол полных сдвижений, град); D_1, D_2 — размеры очистной выработки соответственно вкост простирания и по простиранию пласта, м; H — средняя глубина разработки, м.

В [3] максимальное оседание рассчитывается формулой, применяемой в Кузбассе, Печорском бассейне и ранее в Донбассе; предложена формула с иным видом подкоренного выражения: $\eta_m = q_0 m \cos \alpha \sqrt{t_1 t_2}$, где $t_1 = K_1(D_1 / H - a)$ и $t_2 = K_1(D_2 / H - a)$; K_1 и a — некоторые эмпирические коэффициенты.

В [6] метод определения η основывается на закономерностях механики сплошной среды, рассматривается реальный массив, состоящий из основных коренных пород и наносов. Максимальное оседание для горизонтальных и пологопадающих залежей

$$\eta_m = -\eta_0 \Phi \frac{D_p}{C_p H},$$

где D_p — полудлина выработки, м; C_p — расчетный коэффициент, учитывающий мощность наносов и физико-механические свойства горных пород.

Данный способ отличается от традиционных эмпирических, так как в нем используются углы сдвижения ($\delta, \beta, \gamma, \theta$ и т. д.).

В [7] по результатам численного моделирования построены аналитические зависимости, описывающие форму мульды оседания земной поверхности под влиянием подземной разработки пологопадающей пластообразной залежи. Предложено несколько подходов к описанию параметров мульды оседания земной поверхности, а именно аппроксимация функцией вида

$$v(x) = -\frac{\eta_m}{2} \left[\Phi \left(\frac{D_p + x}{C_p H} \right) + \Phi \left(\frac{D_p - x}{C_p H} \right) \right]. \quad (2)$$

Суть численного моделирования заключается в следующем: задается произвольный набор параметров E_s (модуль Юнга), v , H , h_1 , $2h$, решается задача о нахождении напряженно-деформированного состояния массива в рамках двухслойной модели и определяется форма мульды оседания земной поверхности. После этого образованная мульда аппроксимируется функцией вида (2), находятся соответствующие параметры: η_m (максимальное оседание), D_p (коррелирует с протяженностью выработки L , $D_p = 0.7 - 0.9L$), C_p (характеризует зависимость между мощностью основной кровли h_1 и глубиной отработки H).

Во временных правилах охраны сооружений от вредного влияния подземных разработок на рудниках ПО «Жезказганцветмет» ТОО «Корпорация Казахмыс» [8] максимальное оседание земной поверхности вычисляют по формуле $\eta_m = 0.2m / C$, где m — вынимаемая мощность рудной залежи, м; C — содержание серых песчаников в налегающей толще горных пород. Разработанные формулы по определению оседания земной поверхности получены эмпирическим путем после измерений деформирования земной поверхности, во всех формулах используются эмпирические коэффициенты, что ограничивает область их применения.

При оценке исследований состояния земной поверхности и формирования граничных условий в массиве горных пород в результате влияния подземных работ по рассматриваемым методам сделаны следующие выводы.

1. В действующих инструктивных документах границы зон деформаций мульды сдвижения находят с помощью углов обрушения, сдвижения, граничных углов, которые проводят от верхних границ отработанного и обрушенного пространства. При этом не учитываются деформации сжатия боковых границ очистного пространства, так как в случае их предельных состояний увеличиваются размеры выработки, что способствует увеличению длины мульды сдвижения, которое необходимо учитывать при наличии на поверхности земли охраняемых подрабатываемых объектов и проведении мероприятий по их защите.

2. В методах расчета кривой оседания земной поверхности вертикальное максимальное смещение η_m рассчитывается по натурным данным, что соответствует только условиям этого месторождения. Применение способа типовых кривых предусматривает установление среднего оседания по фактическим данным на различных наблюдательных станциях без тщательного анализа однородности величин, что приводит к получению различных результатов и ненадежности способа такого предрасчета.

3. В методах определения оседания земной поверхности η требуется задать эмпирические коэффициенты, рассматриваемые формулы используются для конкретного месторождения и не позволяют сделать прогнозный расчет для неизученных горно-геологических условий.

Исходя из вышеизложенного, возникает необходимость продолжения исследований состояния налегающей толщи горных пород, расположенной над выработанным пространством.

Предлагаемый прогнозный метод расчета оседания земной поверхности основан на построении кривых линий скольжения в массиве горных пород [9, 10]. Построение зон деформаций в массиве горных пород над выработанным пространством при подземной разработке месторождений осуществляют по способу из [9]. Построением над выработкой свода естественного равновесия фиксируется степень влияния подземных горных разработок на поверхность земли. Границы свода обрушения или свода естественного равновесия и зон

мульды сдвижения (зоны плавных деформаций, зоны опасных сдвижений и обрушений, зоны образования провала) устанавливаются с помощью поверхностей скольжения трех семейств [9, 10]. Кривые линий скольжения строятся на основе паспортов прочности горных пород, рассчитанных и построенных для каждого типа пород в отдельности.

Огибающая кривая к предельным кругам обычно принимается в виде кривых типа параболы, гиперболы или прямой линии, что не всегда отражает действительную форму, получаемую на основе экспериментов. В [10] уравнение огибающих предельных кругов напряжений выводится на основе теории затухающих колебаний, в результате находим следующее уравнение:

$$\tau_{ni} = \sigma_{сж} (0.5 \cos \rho_{сж} + \{1 - K \exp[-(\sigma_{ni} / \sigma_{сж})]\} \operatorname{tg} \rho_{сж}),$$

где $\sigma_{сж}$ — прочность породы на одноосное сжатие, т/м²; $\rho_{сж}$ — угол внутреннего трения при одноосном сжатии, град; $K = \exp[0.5(1 - \sin \rho_{сж})]$ — безразмерный параметр; τ_{ni} — касательное напряжение, σ_{ni} — нормальное напряжение в рассматриваемой точке i , т/м².

С учетом этого уравнения огибающей предельных кругов напряжений определяются угловые, прочностные, линейные величины, коэффициенты бокового распора. В зависимости от напряженного состояния горных пород находятся координаты кривых линий скольжения и обосновывается существование в массиве горных пород трех семейств поверхностей скольжения:

$$x_{1i} = 0.5(y_i - y_m)[(\cos \beta_i / \sin^2 \beta_i) - \ln \operatorname{tg}(\beta_i / 2)] \sin \beta_i;$$

$$x_{2i} = (y_i - y_m)[\ln \operatorname{tg}(\beta_i / 2)] \sin \beta_i;$$

$$x_{3i} = (y_i - y_m)[(\cos \theta_i / \sin^2 \theta_i) - \ln \operatorname{tg}(\theta_i / 2)] \sin \theta_i; y_i = (\sigma_{ni} + \tau_{ni} \operatorname{tg} \theta_i) / \gamma,$$

здесь y_i — ординаты точек кривых линий скольжений трех семейств, м; x_{1i} , x_{2i} , x_{3i} — абсциссы точек кривых линий скольжений первого, второго и третьего семейств, м; y_t — глубина вертикального отрыва, $y_t = \sigma_p / \gamma$, м; σ_p — прочность породы на одноосное растяжение, т/м²; γ — объемный вес породы, т/м³; $\beta_i = \operatorname{arctg}(\tau_{ni} / \sigma_{ni})$, град; $\theta_i = 45^\circ + 0.5\rho_i$, град, ρ_i — угол наклона касательной к огибающей в i -й точке, град.

Первая линия (x_1) является линией действия тангенциальных, а вторая (x_2) — нормальных напряжений. Третье семейство линий скольжения (x_3) формируется в массиве после постановки граничных условий, где контуры ограничиваются кривыми поверхностей скольжения второго семейства при $\sigma_{ni} \geq \sigma_{сж}$. Кривые поверхностей скольжения строятся для каждого типа горных пород отдельно, что дает возможность учитывать их конкретные напряженные состояния и физико-механические свойства. Это, в свою очередь, позволяет установить границы сдвижения горных пород в массиве в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий на данном месторождении. При описании особенностей деформирования массива горных пород кривыми линиями скольжения удастся более точно определить характер и границы деформирования массива.

При обработке рудных залежей условие устойчивости земной поверхности можно записать так:

$$S_{обр} + S_{оч.выр} \geq S_{обр} K_p, \quad (3)$$

где $S_{обр}$ — предполагаемая площадь обрушения, границы которой устанавливаются кривыми 2-го семейства; $S_{оч.выр} = L_{ов} m$ — площадь очистной выработки; $L_{ов}$ — ширина очистной выработки; m — мощность отрабатываемой залежи; K_p — коэффициент разрыхления пород.

Из условия (3) максимально возможный коэффициент разрыхления K_p , обеспечивающий минимальное оседание земной поверхности

$$K_{p.\max} = \frac{S_{\text{обр}} + S_{\text{оч.выр}}}{S_{\text{обр}}}, \quad (4)$$

из условия (4) ожидаемая площадь мульды сдвижения

$$S_{\text{м.с.}} = S_{\text{обр}} + S_{\text{оч.выр}} - S_{\text{обр}} K_p. \quad (5)$$

После преобразования (5) получим

$$S_{\text{м.с.}} = S_{\text{обр}}(1 - K_p) + L_{\text{ов}} m. \quad (6)$$

Площадь мульды сдвижения рассчитывают так же, как площадь прямоугольника, равную произведению длины мульды сдвижения L на вертикальные деформаций:

$$S_{\text{м.с.}} = L\eta, \quad (7)$$

где η — вертикальные деформации земной поверхности.

Из (6) и (7) имеем

$$\eta = \frac{S_{\text{обр}}(1 - K_p) + L_{\text{ов}} m}{L}. \quad (8)$$

Величина η определяется на стадии проектирования подземных горных работ, учитывает горно-геологические условия рассматриваемого месторождения, коэффициент разрыхления K_p горных пород, размеры выработанного пространства. Формула (8) позволяет установить оседание земной поверхности для различных ранее не изученных месторождений.

МЕТОД РАСЧЕТА ОСЕДАНИЙ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И ПОЛОГОПАДАЮЩИХ ЗАЛЕЖЕЙ ИЗ ОДНОТИПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОД

Для месторождения, сложенного из однотипных горных пород с выработкой, расположенной на глубине H , шириной $L_{\text{ов}}$, границы зоны обрушения и опасных сдвижении определяются кривыми линиями скольжения 2-го семейства MOB и NOA и вертикальными прямыми MQ и NR (рис. 1). Полученное расстояние от точки Q до точки R — длина искомой мульды сдвижения L . Пространство над очистной выработкой, ограниченное данными кривыми, представляет площадь обрушения $S_{\text{обр}}$.

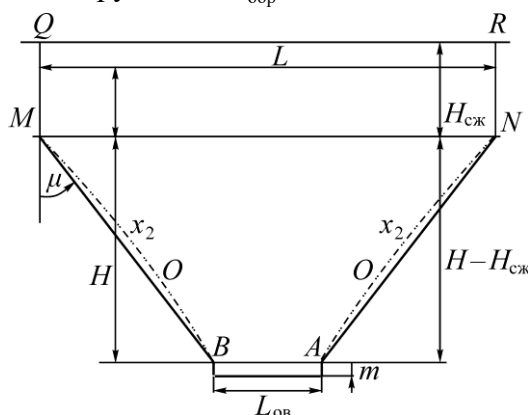


Рис. 1. Определение границ зон деформаций: H — глубина отработки залежи; $H_{\text{сж}}$ — глубина образования зоны одноосного сжатия; $L_{\text{ов}}$ — ширина очистного пространства; L — длина мульды сдвижения; m — мощность отрабатываемой залежи; μ — угол отклонения от вертикали прямой, соединяющей угловую точку верхней границы очистного пространства B с точкой M начала кривой 2-го семейства; — · · — — кривые линии скольжения 2-го семейства (x_2)

На рис. 1 площадь обрушения на разрезе состоит из двух частей: прямоугольной S_{MQRN} и трапециевидальной S_{BMNA} , которые вычисляются так: $S_{MQRN} = H_{сж} L_i$, $S_{BMNA} = 1/2(L_i + L_{об})(H_i - H_{сж})$, где $H_{сж} = \sigma_{сж} / \gamma$ — глубина образования зоны одноосного сжатия, м; $L_i = L_{об} + 2(H_i - H_{сж}) \operatorname{tg} \mu$; μ — угол отклонения от вертикали прямой, соединяющей угловую точку верхней границы очистного пространства B с точкой M начала кривой 2-го семейства, град; H_i — глубина разработки, м.

Если кривые линии скольжения 2-го семейства, ограничивающие границы зоны деформации, имеют прямолинейную форму, то (8) для рассматриваемых условий можно записать в следующем виде:

$$\eta_i = \frac{(S_{MQRN} + S_{BMNA})(1 - K_p) + L_{об} m_i}{L_i},$$

откуда

$$\eta_i = \frac{[(L_{об} + (H_i - H_{сж}) \operatorname{tg} \mu_i)(H_i - H_{сж})](1 - K_p) + L_{об} m_i}{L_{об} + 2(H_i - H_{сж}) \operatorname{tg} \mu_i}. \quad (9)$$

Если границы области сдвижения имеют криволинейную форму, то для повышения точности расчетов от $S_{обp}$ вычитают площади S_{MQB} и S_{NOA} , которые с расширением глубины ведения горных работ увеличиваются в размерах, что учитывается в расчетной формуле (9). Искомые площади S_{MQB} и S_{NOA} определяются геометрическими или механическими способами, при этом формула (9) примет вид

$$\eta_i = H_{сж}(1 - K_p) + \frac{[(L_{об} + (H_i - H_{сж}) \operatorname{tg} \mu_i)(H_i - H_{сж}) - S_{MQB} - S_{NOA}](1 - K_p) + L_{об} m_i}{L_{об} + 2(H_i - H_{сж}) \operatorname{tg} \mu_i}. \quad (10)$$

Точность расчетов по (10) η с увеличением глубины разработки H повышается и составляет 10–15 % по сравнению с (9).

На рис. 2 приведены зависимости оседаний земной поверхности η от глубины разработки H ($H_i = 150–510$ м) для различных мощностей залежи m ($m = 10–40$ м), $K_p = 1.03$ при разработке горизонтальных залежей из однотипных горных пород.

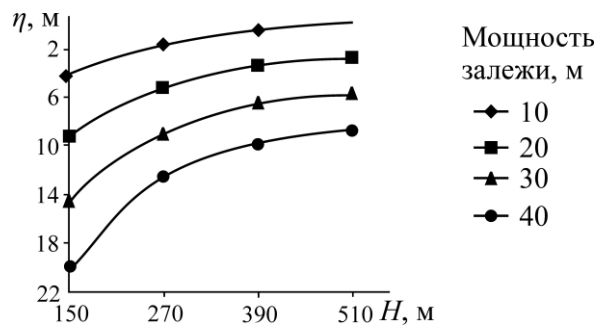


Рис. 2. Зависимость оседания земной поверхности η от H при разработке горизонтальных залежей из однотипных горных пород

На основе анализа установлено, что с повышением мощности залежи, глубины разработки оседание земной поверхности увеличивается, а при росте значения коэффициента разрыхления горных пород — уменьшается.

МЕТОД РАСЧЕТА ОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ И ПОЛОГОПАДАЮЩИХ ЗАЛЕЖЕЙ ИЗ ПЕРЕСЛАИВАЮЩИХСЯ ГОРНЫХ ПОРОД

Предполагаемая площадь обрушения состоит из n -й суммы площадей прямоугольной и трапецидальной форм, где n — количество переслаивающихся слоев. Тогда площадь обрушения определяется из зависимости

$$S = S_{MQRN} + \sum_{k=1}^n S_{\kappa k} + \sum_{k=1}^n S_{ck}, \quad (11)$$

здесь $S_{MQRN} = LH_{сж}$, m^2 ; $\sum_{k=1}^n S_{\kappa k}$ — сумма площадей слоев по алевролитам, m^2 ; $\sum_{k=1}^n S_{ck}$ — сумма площадей слоев по песчаникам, m^2 (рис. 3).

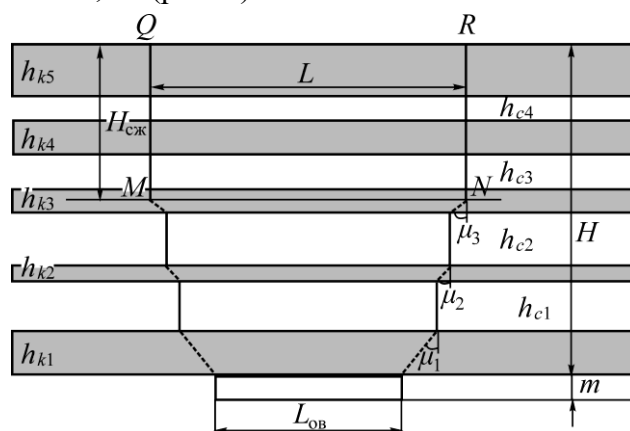


Рис. 3. Определение границ зон деформаций при разработке горизонтальных залежей для переслаивающихся горных пород: h_k — мощность алевролитов; h_c — мощность песчаников; L — длина мулды сдвижения; μ — углы отклонения кривых от вертикали

Площадь 1-го слоя алевролита в непосредственной кровле очистной выработки находится как

$$S_{\kappa 1} = (L_{об} + 2h_{\kappa 1} \operatorname{tg} \mu_1) h_{\kappa 1},$$

где $L_{об}$ — ширина очистной выработки, м; $h_{\kappa 1}$ — мощность 1-го слоя алевролита, м.

Площади последующих слоев алевролитов от кровли выработки рассчитываются по зависимости

$$S_{\kappa k} = \left(L_{об} + \sum_{k=1}^{n=k-1} 2h_{\kappa k} \operatorname{tg} \mu_k + h_{\kappa k} \operatorname{tg} \mu_k \right) h_{\kappa k}.$$

Площадь 1-го слоя песчаника в непосредственной кровле очистной выработки устанавливается по формуле

$$S_{c1} = L_{об} h_{c1},$$

где h_{c1} — мощность 1-го слоя песчаника, м.

Площади последующих слоев песчаников от кровли выработки

$$S_{ck} = \left(L_{об} + \sum_{k=1}^n 2h_{\kappa k} \operatorname{tg} \mu_k \right) h_{ck}.$$

Формула (8) с учетом зависимости (11) для рассматриваемых горно-геологических и горнотехнических условий запишется в следующем виде:

$$\eta_1 = H_{\text{сж}}(1 - K_p) + \frac{\left(\sum_{k=1}^n S_{\kappa k} + \sum_{k=1}^n S_{\text{сж}k} \right) (1 - K_p) + L_{\text{об}} m_i}{L_{\text{об}} + \sum_{k=1}^n 2h_{\kappa k} \text{tg} \mu_k}.$$

МЕТОДИКА ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗНОГО ПРОФИЛЯ МУЛЬДЫ СДВИЖЕНИЯ ПРИ ОДНОТИПНЫХ ГОРНЫХ ПОРОДАХ

В практике встречаются условия, когда необходимо построить профиль мульты сдвижения при выходе обрушения на поверхность. Для этого рассчитывают вертикальные смещения земной поверхности в зоне образования провала, а также плавных деформаций. Оседание земной поверхности при возможном выходе обрушения на поверхность земли определяют по (9), (10). Сначала устанавливают оседание земной поверхности в зоне провала площадью $S_{\text{ВТТл}QRTnA}$, которая будет иметь максимальное значение $\eta_1 = \eta_{\text{max}}$ (рис. 4).

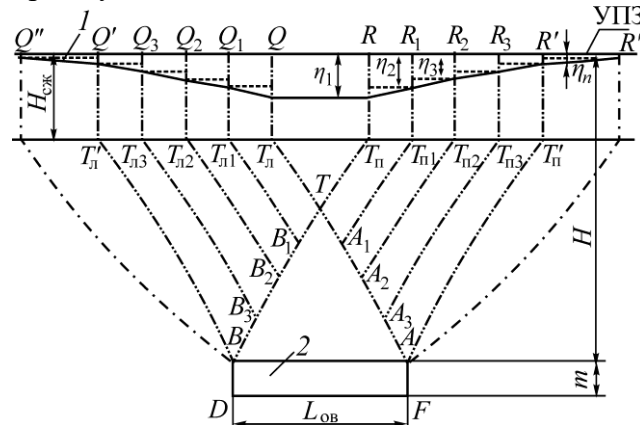


Рис. 4. Профиль мульты сдвижения при возможном выходе обрушения на поверхность: 1 — профиль мульты сдвижения; 2 — очистное пространство; --- — кривая 1-го семейства; --- — кривая 2-го семейства; УПЗ — уровень поверхности земли

От поверхности обнажения происходит поэтапное смещение послесводовой части толщи горных пород, расположенной за внешним контуром свода, в сторону обрушенной части надсводового пространства. Для расчета оседания точек земной поверхности криволинейные участки предельного свода BT и AT разбиваются на несколько условных участков точками $B_1, B_2, \dots, B$ и $A_1, A_2, \dots, A$, с которых влево и вправо проводят кривые линии скольжения 2-го семейства до глубины $H_{\text{сж}}$, а с $H_{\text{сж}}$ — до поверхности земли в виде вертикальной прямой до точек Q_1 и R_1, Q_2 и $R_2, \dots, Q$ и R соответственно. В результате получают условные послесводовые площади обрушения: $S_{\text{ВТТл}QRTnA}$, $S_{\text{ВВ1Тл1}Q1R1Tn1A1A}$, $S_{\text{ВВ2Тл2}Q2R2Tn2A2A}$, $\dots$, $S_{\text{ВТл}Q'R'Tn'A}$, которые поэтапно смещаются друг за другом в сторону провалообразования. Далее в порядке последовательности возрастания объема обрушаемых и разрыхляемых горных пород, начиная с наименьшей послесводовой площади обрушения, находят $\eta_2, \eta_3, \dots, \eta_{n-1}$, значения которых уменьшаются с увеличением площади обрушения $\eta_1 > \eta_2 > \eta_3 > \eta_{n-1}$. Кривые, проведенные от точек B и A до точек Q' и R' земной поверхности, ограничивают зону опасных сдвижений и обрушений.

Из точек B и A проводят кривые линии скольжения 1-го семейства до глубины $H_{сж}$, после достижения которой строят вертикальные прямые до точек Q'' и R'' . В результате определяются границы зоны плавно деформирующегося массива $S_{BQ''R''A}$. Вычисленные оседания земной поверхности в рассматриваемой зоне будут иметь минимальные значения. Соединяя крайние точки вычисленных и построенных на разрезе уровней $\eta_{\max}, \eta_2, \eta_3, \dots, \eta_{n\min}$, получают искомый профиль мульды сдвижения.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ПРОГНОЗНОГО ПРОФИЛЯ МУЛДЫ СДВИЖЕНИЯ ПРИ ПЕРЕСЛАИВАЮЩИХСЯ ГОРНЫХ ПОРОДАХ В КОНКРЕТНЫХ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Порядок расчета вертикальных смещений η земной поверхности в геологических разрезах по профильной линии № 115 Восточно-Жезказганского рудника в данных горнотехнических условиях представлен ниже (рис. 5).

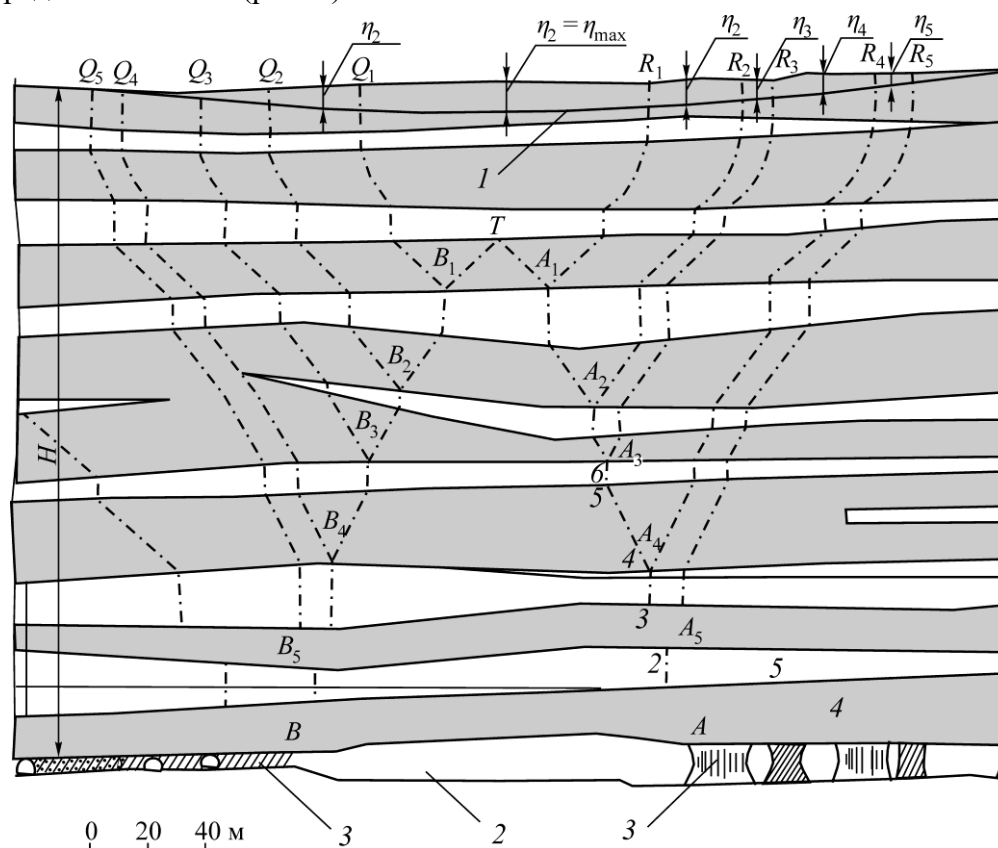


Рис. 5. Построение профиля мульды сдвижения при переслаивающихся горизонтальных и пологоспадающих залежах: — — — — — кривая линии скольжения 1-го семейства; — — — — — кривая линии скольжения 2-го семейства; 1 — предполагаемый профиль мульды сдвижения; 2 — выработанное пространство; 3 — барьерные целики; η_1 — вертикальные смещения земной поверхности; 4 — алевролиты; 5 — серые песчаники

1. Кривыми линиями скольжения 2-го семейства над очистной выработкой из точек B и A строится свод предельного равновесия — ВТА [10].

2. Для расчета вертикальных смещений земной поверхности в зоне опасных деформаций и сдвижений находятся предполагаемые площади обрушения, которые поэтапно смещаются друг за другом в сторону образования провала. Принцип построения границ зон обрушения

заключается в следующем: предварительно нанесенные на кальку кривые линии скольжения 2-го семейства прикладывают к точкам B и A так, чтобы начальная точка кривых ($Y_i = 0; x_i = 0$ м) совпадала с земной поверхностью на разрезе, и выбирают точку 1, расположенную на контакте первого слоя алевролита и последующего первого слоя песчаника. Серые песчаники Жезказганского месторождения имеют большую прочность ($\sigma_{сж} = 80-100$ МПа = 8000 т/м², $H_{сж} = \sigma_{сж} / \gamma = 8000 / 2.6 = 3077$ м), следовательно, в серых песчаниках на глубине ведения горных работ кривые линии скольжения не формируются, а поверхности скольжения в них проходят перпендикулярно плоскости напластования [10]. Здесь $H_{сж}$ соответствует глубине начала искривления кривых линий скольжения в условиях сжатия.

Таким образом, от точки 1 по первому слою песчаника проводится вертикальная линия до точки ее контакта со вторым слоем алевролита, она обозначается точкой 2, к которой прикладывают снова кривые 2-го семейства. Во втором слое алевролита, проведя x_2 , определяется точка 3. От нее по второму слою песчаника опускается снова линия, перпендикулярная его напластованию, до точки ее контакта с третьим слоем песчаника, получается точка 4. Аналогичным образом проходит построение в последующих слоях песчаников и алевролитов.

От границ предельного свода ВТ и АТ, начиная с точек контакта второго слоя алевролита (от непосредственной кровли очистной выработки) с первым слоем песчаника B_5 и A_5 , проводятся влево и вправо кривые линии скольжения 2-го семейства до поверхности земли и находятся точки Q_5 и R_5 соответственно.

Аналогичные построения с помощью кривых 2-го семейства выполняют с каждой из последующих контактных точек B_4 и A_4 , B_3 и A_3 , B_2 и A_1 до точек Q_4 и R_4 , Q_3 и R_3 , Q_1 и R_1 земной поверхности. В результате получают площади обрушения $BB_5Q_5R_5A_5A$, $BB_4Q_4R_4A_4A$, ..., $BB_1Q_1R_1A_1A$. Кривые 2-го семейства, проведенные от точек B и A до точек Q_5 и R_5 , ограничивают зону опасных деформаций и обрушений [10].

3. От точек B и A также проводят влево и вправо кривые линии скольжения 1-го семейства до земной поверхности. Эти поверхности скольжения ограничивают зону мульды с плавными деформациями.

4. Вычисляется $\eta_1 = \eta_{\max}$ в зоне образования провала $B_5Q_5R_5A$.

5. Определяются $\eta_5, \eta_4, \dots, \eta_1$: в зоне опасных обрушений и сдвижений по полученным в результате построения предполагаемых площадей обрушения $BB_5Q_5R_5A_5A$, $BB_4Q_4R_4A_4A$, ..., $BB_1Q_1R_1A_1A$.

6. В плавно деформирующейся области массива горных пород рассчитывают $\eta_{\min}$.

7. Вычисленные и нанесенные на рассматриваемый разрез значения оседаний η в каждой деформирующейся площади соединяются, в результате чего определяется профиль мульды сдвижения для таких условий.

Ниже представлено сопоставление результатов расчета оседаний земной поверхности с фактическими данными оседаний над отработанными панелями.

Вычисленные значения	Фактические значения
По профильной линии 115 (Восточно-Жезказганский рудник)	
46.90 (панель VI)	18.95; Δ — 27.95
48.29 (панель V)	37.70; Δ — 10.59
29.50 (панель III)	32.60; Δ — 3.10
По профильной линии 52 (Западно-Жезказганский рудник)	
10.14 (панель ПЮ 4)	10.80; Δ — 0.57

17.65 (панель 17)	10.94; Δ — 6.71
По профильной линии 111 (Западно-Жезказганский рудник)	
29.93 (панель XI)	25.00; Δ — 4.93
32.85 (панель П-27 ^{низ})	24.85; Δ — 8.00

Здесь Δ — разность между средним вычисленным значением η и фактическими данными.

Удовлетворительное соответствие результатов подтверждает возможность расчета деформаций земной поверхности в пределах мульды сдвижения по предложенной методике.

ВЫВОДЫ

Предлагаемый метод определения оседаний земной поверхности позволяет прогнозировать и рассчитывать оседания земной поверхности η на стадии проектирования подземных разработок, оценивать влияние подработки на состояние охраняемых наземных объектов. Границы зоны деформирования горных пород, образующихся при ведении подземных работ, устанавливаются с помощью построения линий скольжения, которые рассчитываются на основе паспорта прочности рассматриваемых горных пород, вследствие чего данный метод не ограничивается условиями конкретного месторождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авершин С. Г. Горные работы под сооружениями и водоемами. — М.: Углетехиздат, 1954.
2. Казаковский Д. А. Сдвижение земной поверхности под влиянием горных разработок. — М.: Углетехиздат, 1953. — 227 с.
3. Сдвижение горных пород и земной поверхности в главнейших угольных бассейнах СССР / под ред. С. Г. Авершина, Д. А. Казаковского, М. В. Короткова и др. — М.: Углетехиздат, 1958. — 250 с.
4. Канлыбаева Ж. М. Закономерности сдвижения горных пород в массиве. — М.: Наука, 1968.
5. Акимов А. Г., Земисев В. Н., Кацнельсон Н. Н. Сдвижение горных пород при подземной разработке угольных и сланцевых месторождений. — М.: Недра, 1970.
6. Муллер Р. А. Влияние горных выработок на деформацию земной поверхности. — М.: Углетехиздат, 1958.
7. Кузнецов С. В., Трофимов В. А. Деформирование массива горных пород при выемке пологопадающей пластообразной залежи твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. — 2007. — № 4. — С. 3–24.
8. Методические рекомендации по охране сооружений от вредного влияния подземных разработок на рудниках ПО “Жезказганцветмет”. — КазНИМИ, ПО “Жезказганцветмет, 2011.
9. Сабденбекулы О. С. Геомеханика. — Караганда: САНАТ-Полиграфия, 2009.
10. Сабденбекулы О. С. Физика сдвижения горных пород. — Караганда: КарГТУ, 2011.

Поступила в редакцию 26/IX 2019

После доработки 11/III 2020

Принята к публикации 10/IV 2020