Доклады Национальной академии наук Беларуси

2016 **март–апрель** **Том 60 № 2**

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 622.285;622.861.213.24

Член-корреспондент В. Я. ПРУШАК

ДЕФОРМАЦИЯ КОНТУРА ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ГЛУБИНАХ ЗАЛОЖЕНИЯ

Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством, Солигорск, Беларусь
ipr@sipr.by

Изучено влияние глубины заложения подготовительных и капитальных выработок на характер и интенсивность деформирования их контура в условиях второго и третьего горизонтов Старобинского месторождения калийных солей. Показано, что при прогнозе устойчивости выработок необходимо учитывать не только глубину их заложения, но и агрегатную прочность пород, вмещающих выработки, размеры поперечного сечения выработок и наличие в них мер охраны в виде компенсационных щелей. Разработаны формулы для расчета времени устойчивого состояния выработок с учетом указанных выше факторов.

Ключевые слова: горный массив, глубина заложения, горная выработка, контур, соляная порода, прочность, горное давление.

V. Ya. PRUSHAK

DEFORMATION OF THE EDGE OF THE WORKINGS OF THE STAROBIN DEPOSIT OF POTASH SALTS AT DIFFERENT LOCATION DEPTHS

Soligorsk Institute of Problems of Resources's Saving with Experienced Production, Soligorsk, Belarus
ipr@sipr.by

The article deals with the study of the influence of the location depth of development and main workings on the behavior and deformation intensity of their edge in the conditions of the second and third horizons of the Starobin deposit of potash salts. It is shown that while forecasting the stability of workings, it is necessary to consider not only the location depth, but also the aggregate rock strength, the cross-section size of workings and the availability of compensation slots as the ways of protection. Formulas have been developed to calculate the time of the steady state of workings taking into account the above-mentioned factors.

Keywords: mountain massif, the depth of laying, mine working, outline, salt rock, strength, mountain pressure.

Введение. Основными формами проявления горного давления в выработках Старобинского месторождения калийных солей являются ползучесть вмещающих их приконтурных пород, а также расслоение и отслоение по глинистым прослойкам. Опыт разработки месторождения свидетельствует, что одним из основных факторов, влияющих на указанные проявления горного давления, является глубина заложения выработок.

В настоящем сообщении рассматриваются результаты исследования влияния указанного фактора на деформирование контура выработок, расположенных на различных глубинах второго и третьего горизонтов Старобинского месторождения калийных солей.

Материалы и методы исследования. Для определения влияния на характер деформирования пород фактора глубины наблюдения проводились преимущественно в одиночных выработках с пролетом 3 м (рис. 1), охраняемых и не охраняемых компенсационными щелями.

Инструментальные наблюдения в таких выработках организовывали сразу после их проходки, продолжительность этих наблюдений зависела от применения в них мер охраны и проходки влияющих выработок. Как правило, время таких наблюдений составляло 40–60 суток, а в отдельных выработках – до 360 суток. Замеры и обработку результатов выполняли с использованием методик, изложенных в работах [1–3], используя следующие исходные расчетные формулы:

комплексный агрегат вида $\delta K_в$:

$$\delta K_в = \frac{0,3U_{бб}}{3R(t_2^{0,3} - t_1^{0,3})}\frac{E}{\gamma H}, \quad (1)$$

где $U_{бб}$ – конвергенция стенок выработки за интервал времени $[t_2–t_1]$, м; E – модуль упругости пород, МПа; H – глубина заложения выработки, м; γ – средняя плотность вышележащих по-

© Прушак В. Я., 2016.



Рис. 1. Горная выработка с пролетом 3 м

род, МН/м^3; R – усредненный радиус выработки, м; δ – размерный параметр ядра ползучести, $c^{\alpha-1}$; α – безразмерный параметр ядра ползучести (α = 0,7); $K_в$ – коэффициент взаимовлияния выработки;

конвергенция стенок для установившегося режима деформирования, за который принимаем 2-й год существования выработки:

$$U_{\text{бб }2\text{г}} = V_{\text{бб уст}} = 0,574\delta RHK_{\text{в}},\ \text{мм}; \qquad (2)$$

конвергенция кровли с почвой за первый год:

$$U_{\text{КП }1\text{г}} = U_{\text{бб}1\text{г}}\,0,5K_{\text{КП}} = 1,24\delta RHK_{\text{в}}K_{\text{КП}},\ \text{мм}, \qquad (3)$$

где $K_{\text{КП}}$ – коэффициент неравномерности смещения контура;

конвергенция кровли с почвой для установившегося режима:

$$V_{\text{КП уст}} = U_{\text{бб }2\text{г}}K_{\text{КП}} = 0,574\delta RHK_{\text{в}}K_{\text{КП}},\ \text{мм}; \qquad (4)$$

время устойчивого состояния незакрепленной выработки:

$$t = (U_{\text{КП доп}} - U_{\text{КП }1\text{г}}) / V_{\text{КП уст}},\ \text{лет}, \qquad (5)$$

где $U_{\text{КП доп}}$ – величина допустимой конвергенции кровли с почвой, мм.

Результаты и их обсуждение. Проявления свойств ползучести соляных пород вокруг выработок происходят в виде смещения этих пород внутрь выработки. Как известно, ползучесть соляных пород в зависимости от уровня нагрузки и их прочностных свойств может протекать в трех стадиях: затухающей, линейной и незатухающей, т. е. прогрессирующей ползучести. При первой стадии ползучесть соляных пород происходит без нарушения их сплошности. При второй и третьей стадиях ползучести происходит разрыхление, увеличение объема (разуплотнение), нарушение сплошности соляных пород, вследствие чего в окрестности контура выработок особенно быстро на третьей стадии образуются заколы и вывалы. Поэтому для прогноза устойчивости выработок крайне важно знать, на какой стадии ползучести происходит деформирование выработок в текущий момент времени, при каких условиях ползучесть вмещающих их пород переходит в прогрессирующую стадию.

При испытании на длительную прочность образцов В. С. Ливенским установлено [4; 5], что переход из стадий затухающей или линейной в стадию прогрессирующей ползучести осуществляется при достижении предела длительной прочности $\sigma_{\text{сж}}^{\infty} = 0,68\sigma_{\text{сж}}$, (где $\sigma_{\text{сж}}$ – «мгновенная» прочность образца на одноосное сжатие). Если не принимать во внимание образование на контуре выработки концентрации напряжений (а с течением времени напряжения на контуре выработки, заложенной в соляных породах, существенно уменьшаются) и в качестве нагрузки принять $\sigma_{\text{сж}} = \gamma H$ (где γ – усредненный объемный вес вышележащих пород, γ = 21 кН/м^3), можно ориентировочно определить глубину H^{∞}, при которой будет достигнут предел длительной прочности приконтурных пород на сжатие. При агрегатной прочности соляных пород $\sigma_{\text{сж}}$ = 28 МПа приконтурные породы перейдут в стадию прогрессирующей ползучести на глубине $H^{\infty} = 0,68\sigma_{\text{сж}} / \gamma = 0,68 \cdot 28 / 0,021 =$ 906 м. При агрегатной прочности соляных пород $\sigma_{\text{сж}}$ = 26 МПа приконтурные породы перейдут в стадию прогрессирующей ползучести на глубине H^{∞} = 840 м.

Однако переносить результаты лабораторных исследований в натурные условия без дополнительных исследований прочностных свойств пород в массиве неправомерно, кроме того, определить в натурных условиях уровень концентрации напряжений в приконтурных породах выработок довольно сложно. Поэтому граница начала прогрессирующей ползучести пород нами определялась в натурных условиях, по изменению характера деформирования контура в одиночных выработках, находящихся вне зоны влияния очистных работ.

Проявлениями горного давления при расслоении и отслоении пород по глинистым прослойкам являются прогиб кровли, пучение почвы. Эти проявления горного давления могут быть зафиксированы на основании сравнения результатов натурных замеров смещения кровли ΔU_K, кон-

вергенции кровли с почвой $\Delta U_{КП}$ и стенок выработок $\Delta U_{бб}$. В случае, если величина конвергенции кровли с почвой или смещения кровли выработок превышает аналогичные показатели для стенок более, чем в 2 раза (т. е. $\Delta U_{КП} / \Delta U_{бб} \geq 2$, $2\Delta U_{К} / \Delta U_{бб} \geq 2$) [6], можно говорить о наличии этих проявлений горного давления, а при превышении в 5 раз можно утверждать об их существенной роли в разрушении выработки [7].

Для определения влияния на характер деформирования пород фактора глубины наблюдения проводились преимущественно в одиночных выработках с пролетом 3 м и не охраняемых компенсационными щелями. В качестве примера на рис. 2 приведены результаты наблюдений за деформированием контура транспортной сбойки № 6, пройденной на глубине 790 м. Данная выработка в период наблюдений охранялась лишь щелью в почве, замеры в ней осуществлялись с момента проходки в течение 350 суток. Кровля данной выработки располагалась под 0,25 м защитной пачки верхнего сильвинитового слоя.

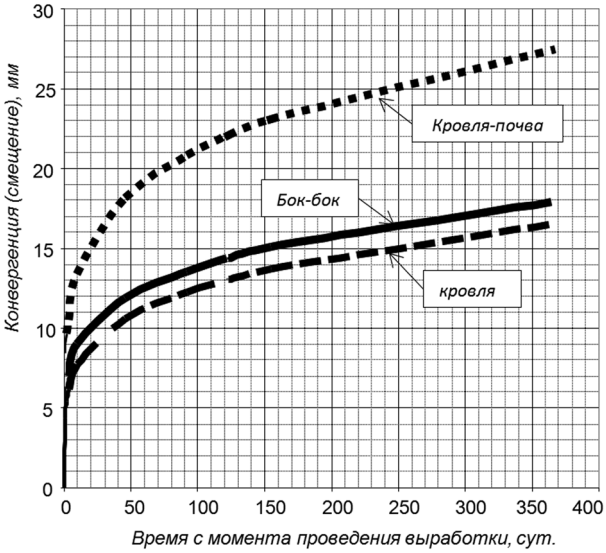


Рис. 2. Характер деформирования контура выработки транспортной сбойки № 6 во времени в районе станции 71 (глубина H = 790 м)

Как видно на рис. 2, для данной выработки характерно превышение скорости деформирования контура в вертикальном направлении по сравнению с горизонтальным в 1,5 раза, коэффициенты, характеризующие неравномерность смещения контура, составят $K_{КП}$ = 3; $K_{К}$ = 2,2, что позволяет сделать вывод о наличии существенных расслоений в почве и незначительных расслоений, отслоений пород в кровле. Характер деформирования кровли и стенок – затухающий во времени, что позволяет сделать вывод о деформировании пород контура выработки в стадии затухающей ползучести. Уровень нагруженности приконтурных пород в данной выработке без учета концентрации напряжений составит: $\gamma H / \sigma_{сж}$ = 0,021 МН/м^3 · 790 м/ 28 МПа = 0,59.

Агрегат $\delta\gamma HE^{-1}$, включающий в себя параметр ползучести δ и рассчитанный по конвергенции стенок с помощью (1), составит $\delta\gamma HE^{-1} = 3{,}09 \cdot 10^{-6} c^{\alpha-1}$. Параметр ползучести δ при α = 0,7 для пород на контуре этой выработки для глубины H = 790 м составляет $\delta = 0{,}00279\ c^{\alpha-1}$.

Расчетное время устойчивого состояния данной выработки, не охраняемой щелями и не попадающей в зону влияния очистных работ и соседних выработок, определенное с помощью формул (2), (4), (5), составляет 7,7 лет.

Аналогичное исследование было выполнено в отношении выработки, заложенной в более слабых породах (агрегатная прочность пород $\sigma_{сж}$ = 26 МПа), выше верхнего сильвинитового слоя на 0,55–0,65 м. Агрегат $\delta\gamma HE^{-1}$, рассчитанный по конвергенции стенок с помощью (1), составит $\delta\gamma HE^{-1} = 4{,}03 \cdot 10^{-6} c^{\alpha-1}$. Параметр ползучести δ при α = 0,7 для пород на контуре этой выработки для глубины H = 800 м составляет $\delta = 0{,}0036 c^{\alpha-1}$. Расчетное время устойчивого состояния данной выработки вне зоны влияния очистных работ, соседних выработок и без охраны щелями, определенное с помощью (2), (4), (5), составит 7 лет. Как показали расчеты, параметр ползучести одиночной выработки δ, расположенной частично выше сильвинитового пласта, т. е. в более слабых породах, на 30 % больше, чем у выработки, заложенной в пласте. Уровень нагруженности приконтурных пород $\gamma H / \sigma_{сж}$ при этом вырастает на 8 %.

Приведенные примеры иллюстрируют, что даже при достижении глубины 800 м ползучесть контура выработок находится на затухающей стадии.

Аналогичным образом определяли параметры ползучести $\delta\gamma HE^{-1}$, δ и уровень нагружения приконтурных пород $\gamma H / \sigma_{сж}$ для других выработок, заложенных на 2 и 3 горизонтах. Значения этих параметров приведены на рис. 3.

По полученным данным получена эмпирическая зависимость (корреляционное отношение составляет η = 0,85), которая имеет вид



Рис. 3. Графики зависимости деформационно-реологического показателя $\delta\gamma HE^{-1}$ от уровня нагруженности $\gamma H / \sigma_{сж}$

$$\delta\gamma HE^{-1}\cdot 10^6 = \begin{cases} 1{,}5c^{\alpha-1} \text{ при } 0{,}3 < \gamma H/\sigma_{сж} \le 0{,}4, \\ 1{,}5\exp(5{,}95(\gamma H/\sigma_{сж} - 0{,}4)c^{\alpha-1} \text{ при } \gamma H/\sigma_{сж} > 0{,}4. \end{cases} \quad (6)$$

Так, согласно этой зависимости, с увеличением глубины H от 400 до 750 м и агрегатной прочности пород $\sigma_{сж}$ = 28 МПа (при этом уровень нагрузки $\gamma H / \sigma_{сж} \in$ [0,30; 0,56]), комплексный агрегат $\delta\gamma HE^{-1}$ изменяется в пределах $1{,}5\cdot 10^{-6}$–$4\cdot 10^{-6}c^{\alpha-1}$, а параметр ползучести на контуре одиночной выработки при $E = 1{,}5\cdot 10^4$ МПа изменяется в узких пределах: $\delta \in$ [0,0024; 0,0038] $c^{\alpha-1}$. Средние значения параметра ползучести составляют $\delta' = 0{,}0031c^{\alpha-1}$. Эта величина соответствует параметру ползучести для одиночных выработок, расположенных на глубине 680 м. Именно это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что с ростом глубины в интервале $H \in$ [400; 750] м происходит незначительный рост скорости деформирования контура, вызванный изменением ползучести.

С достижением глубин H_1 = 800 м и H_2 = 950 м при неизменной агрегатной прочности пород $\sigma_{сж}$ = 28 МПа параметр ползучести соответственно составит $\delta_1 = 0{,}0035c^{\alpha-1}$, $\delta_2 = 0{,}0092c^{\alpha-1}$, что выше δ' соответственно в 1,4 и в 2,5 раза и указывает на развитие нелинейных деформаций ползучести контура. Скорости деформирования контура выработок на этих глубинах по сравнению с глубиной 680 м вырастут в 2 и 6 раз соответственно. Время устойчивого состояния выработок без охраны их щелями уменьшится с 20 лет соответственно до 8 и 3 лет.

На основании зависимости (6) сделан вывод: при условии, если агрегатная прочность пород $\sigma_{сж}$ с увеличением глубины H останется неизменной и для выработок, пройденных в пласте, составит $\sigma_{сж}$ = 28 МПа, то к критическим будут относиться глубины $H \ge$ 900 м. При этом уже на глубине 900 м скорость деформирования контура будет выше в 1,4 раза по сравнению с глубиной 800 м, а при достижении глубины 950 м она возрастет в 2 раза. Время устойчивого состояния этих выработок без охраны их щелями на глубинах 950 м не превысит 1,4 года. При охране данных выработок щелями время их устойчивого состояния вне влияния других выработок и очистных работ уменьшится с 17 лет (при H = 800 м) соответственно до 8 (при H = 900 м) и 4 (при H = 950 м) лет.

При расположении выработки выше пласта при $\sigma_{сж}$ = 26 МПа критическими будут являться глубины $H \ge$ 840 м. В этих выработках даже при охране их щелями время устойчивого состояния с учетом влияния соседних выработок, но без учета влияния очистных работ по сравнению с достигнутой глубиной 800 м уменьшится с 17 лет (при H = 800 м) до 9 (при H = 900 м) лет и 6 (при H = 950 м) лет соответственно.

Таким образом, очевидно, что фактор ползучести пород на глубинах 840–900 м для выработок может стать определяющим в их разрушении.

Для использования полученной ранее зависимости (6) в практических целях с помощью (4) и (6) ее преобразовали в скорость конвергенции «кровля–почва» в установившийся период дефор-

мирования. Результаты этого преобразования приведены в виде графиков зависимости скорости конвергенции «кровля–почва» в установившийся период деформирования от уровня нагруженности приконтурных пород $\gamma H / \sigma_{сж}$. При этом нами рассматривались выработки, заложенные под защитной пачкой 0,15–0,25 м верхнего сильвинитового слоя, как охраняемые компенсационными щелями, нарезаемыми в кровле, так и неохраняемые.

Как видно на рис. 4, с увеличением уровня нагружения пород до $0{,}75\gamma H / \sigma_{сж}$ (что соответствует глубине 1000 м при $\sigma_{сж}$ = 28 МПа) скорость конвергенции возрастает довольно существенно для выработок без охраны, и в 1,4 раза медленнее – с охраной их щелями. Очевидно, что при охране выработок на больших глубинах роль компенсационных щелей существенно возрастает. Скорость конвергенции кровли с почвой V_0 для выработок без охраны описываются зависимостью вида

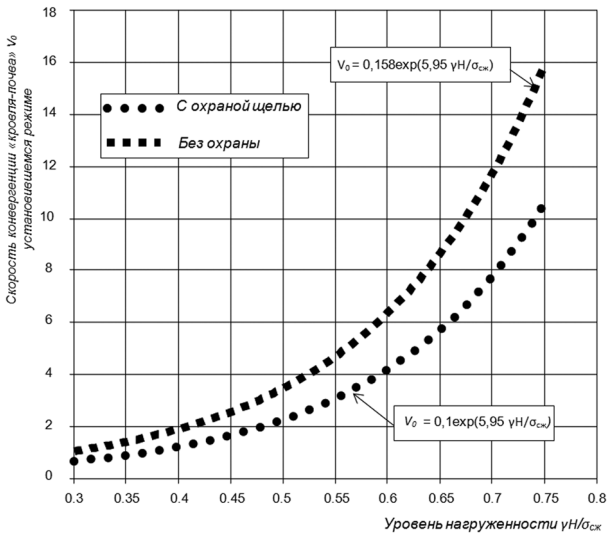


Рис. 4. Графики зависимости скорости конвергенции «кровля–почва» в установившийся период деформирования от уровня нагруженности пород $\gamma H / \sigma_{сж}$

$$V_0 = 0{,}158\exp(5{,}95\gamma H / \sigma_{сж}). \quad (7)$$

Для выработок, охраняемых компенсационной щелью в кровле, уравнение $V_0 = f(\gamma H / \sigma_{сж})$ будет иметь следующий вид:

$$V_0 = 0{,}1\exp(5{,}95\gamma H / \sigma_{сж}). \quad (8)$$

Заключение. Анализ деформирования контура выработки показал, что при прогнозе устойчивости выработок необходимо учитывать не только глубину их заложения H, а также агрегатную прочность пород, вмещающих выработки $\sigma_{сж}$, размеры поперечного сечения выработок и наличие в них мер охраны в виде компенсационных щелей. При этом первые два фактора удобно представлять в виде комплексного показателя уровня нагруженности пласта $\gamma H / \sigma_{сж}$. Все эти факторы можно учесть с помощью (3), (6)–(8).

В результате анализа результатов исследований установлено, что при уровне нагруженности $\gamma H / \sigma_{сж} \geq 0{,}4$ деформирование пород из затухающей стадии переходит в стадию линейной, а при $\gamma H / \sigma_{сж} \geq 0{,}65$–$0{,}7$ в стадию прогрессирующей ползучести. При агрегатной прочности пород, вмещающих выработку $\sigma_{сж}$ = 28 МПа (т. е. при заложении выработки под 0,25 м верхнего сильвинитового слоя) границы перехода между стадиями соответствуют глубинам 550 и 900 м. При $\sigma_{сж}$ = 26 МПа (т. е. при заложении кровли выработки выше верхнего сильвинитового слоя на 0,55 м) границы перехода между стадиями соответственно равны глубинам 500 и 840 м.

Список использованной литературы

1. *Ержанов, Ж. С.* Ползучесть соляных пород / Ж. С. Ержанов, Э. И. Бергман. – Алма-Ата: Наука, 1977. – 110 с.

2. *Константинова, С. А.* Методика определения натурных параметров ползучести горных пород / С. А. Константинова, В. А. Москвин // Изв. вузов. Горный журнал. – 1978. – № 5.

3. *Мисников, В. А.* Прогноз и обеспечение устойчивости капитальных выработок калийных рудников в мелкослоистых породах на больших глубинах: автореф. дис. … канд. техн. наук / В. А. Мисников. – Солигорск, 1991. – 17 с.

4. Результаты исследования реологических свойств соляных пород при одноосном сжатии и изгибе / В. С. Ливенский [и др.] // Изв. вузов. Горн. журнал. – 1973. – № 9. – С. 70–72.

5. *Ливенский, В. С.* Исследование реологических свойств соляных пород для оценки устойчивости обнажений кровли на примере Старобинского месторождения калийных солей: дис. ... канд. техн. наук / В. С. Ливенский. – Л., 1973. – 185 с.

6. *Мисников, В. А.* Совершенствование разработки калийных месторождений / В. А. Мисников. – Пермь, 1987. – С. 48–54.

7. *Ногин, П. П.* Закономерности процесса деформирования горных выработок на Солигорских калийных рудниках и инженерный метод расчета срока их службы вне зоны влияния очистных работ / П. П. Ногин, Б. И. Петровский, В. А. Губанов // Горная механика. – 2003. – № 1. – С. 48–54.

Поступило в редакцию 01.06.2015