



**Б.В. Лаптев,**  
д-р техн. наук,  
ст. науч. сотрудник

ЗАО НТЦ ПБ, Москва,  
Россия

## Оценка опасности целиков по динамическому разрушению в выработанном пространстве соляных рудников

Представлена оценка опасности целиков по динамическому разрушению в выработанном пространстве соляных рудников с использованием натуральных исследований. Показана возможность практической реализации полученных результатов.

**Ключевые слова:** хрупкое разрушение пород в динамичной форме, механические природные параметры пород, горнотехнические факторы, многофакторный регрессионный анализ, закладка выработок.

DOI: 10.24000/0409-2961-2017-10-22-25

### Введение

Согласно методике, изложенной в Методологических основах расчета разделительных целиков и определения удароопасных ситуаций при разработке пластообразных залежей, рассмотрены две горнотехнические ситуации и оценена степень опасности разделительных (барьерных) целиков и целиков, примыкающих к линии фронта очистных работ. Применительно к рассматриваемым условиям, например Верхнекамских калийных рудников, необходимым предположением (условием) является то, что все остальные целики, кроме рассматриваемых, в выработанном пространстве на определенном участке должны перейти в запредельное состояние, не обладать несущей способностью, а породы кровли над отработываемым пластом — зависнуть.

Основные принятые к рассмотрению параметры в статье: глубина разработки  $H$ , м; высота выработок с учетом возможного обрушения пород кровли  $2h$ , м; исходное горное давление  $\gamma H$ , МПа; деформационные параметры пород  $E$  (модуль упругости), МПа; коэффициент Пуассона  $\mu$ ; ширина целиков  $2l$ , м; пролеты выработанных участков (участки с податливыми целиками) пласта  $L^{-1}$ , м; интенсивность реакции целиков  $\sigma_y/(\gamma H)$ ; прочность пород целиков на одноосное сжатие  $\sigma_c$ , МПа; относительная деформация целиков (вертикальная)  $\Delta h/h$ ; ширина выработки  $a$ , м.

### Аналитическое решение задачи

Основное уравнение, связывающее интенсивность реакции целиков и сближение кровли с почвой на участке целика, имеет следующий вид [1]:

$$\frac{\sigma_y}{\gamma H} = A \left( \frac{L}{l} \right) - MB \left( \frac{L}{l} \right) \frac{\Delta h}{h}, \quad (1)$$

$$M = \frac{1}{\gamma H \left( \frac{1 - \mu_{\text{п}}^2}{E_{\text{п}}} + \frac{1 - \mu_{\text{к}}^2}{E_{\text{к}}} \right)} \frac{h}{l}, \quad (2)$$

где  $p, k$  — индексы породы соответственно почвы и кровли;  $A(L/l), B(L/l)$  — функции, которые записываются через полные эллиптические интегралы.

Параметр  $M$  (не путать с модулем спада  $M_{\text{сп}}$ ) — критерий подобия, по которому можно судить об идентичности реакции целика независимо от его физического состояния на сближение кровли с почвой для разных пород, но при одинаковых значениях параметра  $M$ .

Весь процесс нагружения целиков объясняется уравнением (1). Из него, в частности, следует, что реакция целиков и сближение кровли и почвы  $\Delta h/h$  связаны линейно. Чем больше  $\Delta h/h$ , тем меньше  $\sigma_y/(\gamma H)$ , и наоборот.

При постоянном значении  $M$  уравнение (1) описывает поверхность неразрывности взаимодействия вмещающих горных пород целиков на всех стадиях их деформирования до полного разрушения. Каждому значению параметра  $M$  соответствует своя поверхность неразрывности. При постоянных значениях  $L/l$  сечением поверхности неразрывности будут прямые линии, которые описываются в координатной плоскости  $\sigma_y/(\gamma H), \Delta h/h$  уравнением (1). Эти прямые называются образующими поверхности неразрывности, каждая из которых соответствует определенному значению  $L/l$ . Каждый целик имеет диаграмму «напряжение — деформация» со своей запредельной ниспадающей ветвью.

Уравнение диаграммы имеет вид [2]:

$$\sigma_{\text{сж}} = \gamma H F(\Delta h/h);$$

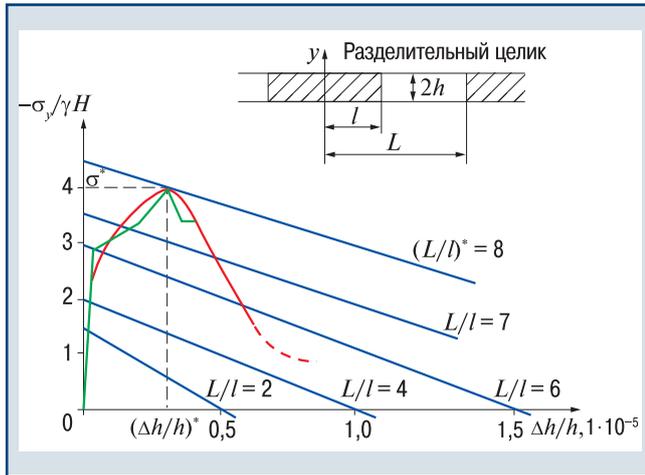
$$F(0) = 1. \quad (3)$$

Совместное решение уравнений (1), (3) показывает зависимость нагрузки на целик и деформации пород целика от  $L/l$ . На поверхности неразрывности это решение представляется в виде кривой, проекция которой на координатную плоскость  $\sigma_y/(\gamma H)$ ,

$\Delta h/h$  будет совпадать с диаграммой «напряжение — деформация» целика на участке существования совместного решения уравнений (1), (3).

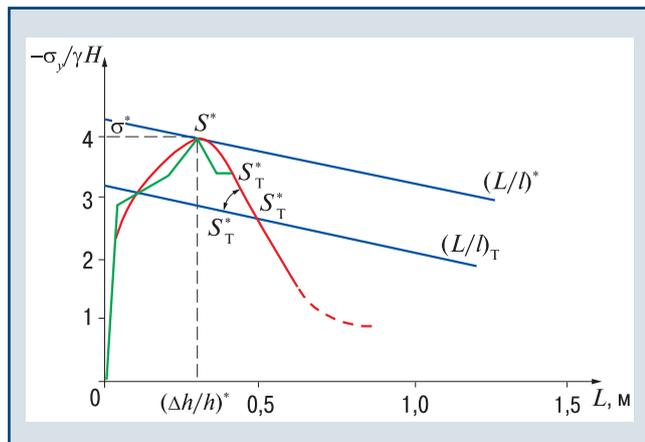
**Использование натуральных исследований и практическая реализация полученных результатов**

На рис. 1–3 показаны полные диаграммы «напряжение — деформация» целика и семейство прямых, проекций, образующих поверхности неразрывности при различных значениях  $M$  и  $L/l$ . Диаграмма построена по натурным данным, полученным на реальных шахтных целиках.



▲ Рис. 1. Проекция линий неразрывности на диаграмму нагружения целика при различной длине выработанного пространства

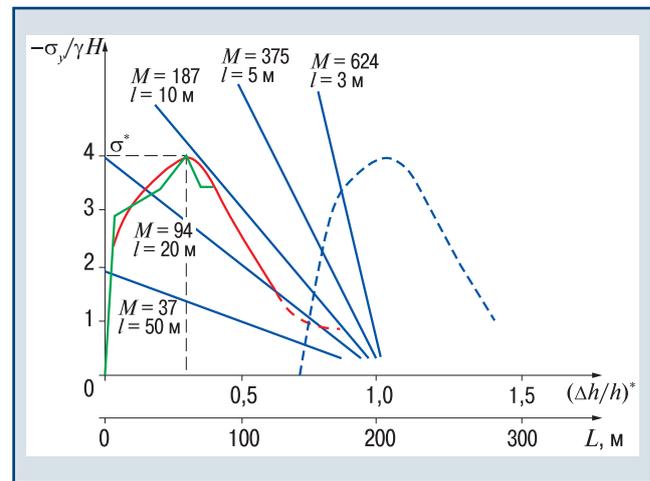
▲ Fig. 1. Projections of continuity lines on the diagram of pillar loading at various lengths of the developed space



▲ Рис. 2. Ползучесть пород целиков

▲ Fig. 2. Creep of pillar rocks

Прямые, которые не пересекают диаграмму, относятся к значениям параметров  $M$ ,  $L$ ,  $l$ ,  $a$ ,  $h$  при несуществующих совместных решениях уравнений (1), (3) из-за разрушения целика. Касательная к ниспадающей ветви диаграммы — критическая (на рис. 1  $L/l = 8$ ). При увеличении относительного пролета  $L/l$  прямые приближаются к критической прямой, до которой целик находится в устойчивом



▲ Рис. 3. Проекция линий неразрывности на диаграмму нагружения целика при  $L = 200$  м (1-я схема) и влияние закладки на диаграмму нагружения (пунктир)

▲ Fig. 3. Projections of continuity lines on the diagram of pillar loading at  $L = 200$  m (1-st diagram) and effect of the back fill on the load diagram (dotted line)

состоянии, а сближение почвы с кровлей идет квазистатически. В случае превышения предельного пролета равновесие вмещающих пород нарушается, и они самопроизвольно переходят в динамическое сжатие целика, т.е. сближение кровли с почвой идет с ускорением (мягкое нагружение), и происходит разрушение пород целика в динамическом виде с выделением кинетической энергии.

На рис. 3 показано влияние критерия  $M$  и ширины целика  $l$  на потенциальную опасность разрушения целиков при различных размерах отработанного пространства; видно, что чем больше  $M$ , тем круче наклон прямых. Это означает, что при определенном  $L$  с увеличением  $M$  вероятность разрушения пород в динамическом виде снижается, так как прямая уходит от касательной линии внутрь диаграммы и, следовательно, будет происходить не выделение, а поглощение энергии породами целиков.

Оценим вероятность хрупкого разрушения под воздействием комплекса факторов. Как следует из рис. 3, чем меньше значение  $M$ , которое зависит от многих факторов, тем ниже вероятность разрушения целиков в динамической форме. Значение  $M$  определяется в том числе модулями  $E$  и  $\mu$ . Известно, чем больше значение модуля упругости  $E$ , тем ниже скорость разрушения пород [3]. Он в наших расчетах принят как среднестатистическая величина, равная  $1 \cdot 10^4$  МПа.

Анализ уравнения (2) показывает также, что с увеличением глубины  $H$  критерий  $M$  уменьшается, а значит, снижается вероятность динамических разрушений пород. Данный эффект общеизвестен из теоретических исследований и практики [3], но многое зависит от соотношения  $L/l$ .

На основании многофакторного регрессионного анализа комплекса факторов, влияющих на

устойчивость целиков, численные значения которых получены как в натуральных, так и в лабораторных условиях на образцах пород, определены зависимости для установления критических значений главных факторов, определяющих опасность разрушения пород: модуля упругости  $E$  и значения выработанного пространства  $L$  при двух схемах расположения целика [4].

Среди анализируемых факторов приняты следующие:  $h/l$ ,  $a$ ,  $\gamma H$ ,  $\sigma_y/(\gamma H)$ .

Получены зависимости:

$$E_1 = 1015,66x_1 - 381,62x_2 + 1161x_3 + 1471x_4 - 5596; \quad (4)$$

$$E_2 = 881,7x_1 - 665,7x_2 + 2314,1x_3 + 2945,2x_4 - 11627; \quad (5)$$

$$L_1 = 1,86x_2 - 27,6x_1 + 9,98x_3 + 18,23x_4; \quad (6)$$

$$L_2 = 3,1x_2 - 45,8x_1 + 16,6x_3 + 30,2x_4, \quad (7)$$

где  $x_1$  —  $h/l$  (отношение высоты к ширине целиков), м;  $x_2$  —  $a$  (ширина выработки), м;  $x_3$  —  $\gamma H$ , МПа;  $x_4$  —  $\sigma_y/(\gamma H)$ ; 1 — индекс 1-й схемы (разделительный опорный целик в выработанном пространстве); 2 — индекс 2-й схемы (целик у линии фронта очистных работ).

Представленные зависимости могут быть использованы для сравнения значения модуля упругости  $E$ , полученного расчетным путем, с фактическим значением по данным лабораторных исследований обрабатываемых пород кровли. Если расчетный модуль упругости  $E_p$  меньше фактического  $E_\phi$ , это указывает на возможное хрупкое разрушение пород целиков в данной горнотехнической ситуации ( $E_\phi > E_p$ ). Аналогично, расчетная величина  $L$  указывает на предельно допустимый размер выработанного пространства с нарушенными целиками  $L_p > L_\phi$ . Так, в случае с аварией на Соликамском рудоуправлении-2 значение предельного пролета с целиками в запредельном состоянии должно было составить 81,5 м с каждой стороны от разделительного целика по пласту АБ (целик образовался за счет неотработанной камеры — эпицентр аварии). Расчетное значение модуля упругости  $E_1$  по (4) составляло  $0,38 \cdot 10^4$  МПа, а фактическое по данным испытаний пород —  $(0,36 \div 0,38) \cdot 10^4$  МПа.

Особый интерес представляет оценка влияния ползучести пород целиков на возможность их хрупкого разрушения. На рис. 2 показана полная диаграмма нагружения целиков и линии неразрывности. В момент остановки горных работ взаимодействие целика и вмещающих его пород соответствует определенной точке  $S_T^*$  на диаграмме. С момента остановки работ в породах развивается

процесс ползучести, деформация  $\Delta h/h$  увеличивается и, если происходит пересечение запредельной ветви  $S_p$ , может произойти их хрупкое разрушение.

В случае возобновления горных работ возможен рост нагрузок и одновременно ползучести пород, тогда пересечение ниспадающей ветви также произойдет в точке  $S_T^*$ . Этот эффект объясняет причину проявлений динамических явлений в выработанных пространствах.

Обратимся к оценке влияния закладочных работ в выработанном пространстве как к мероприятию по снижению вероятности хрупкого разрушения пород целиков. На рис. 3 показаны две диаграммы нагружения целиков: без закладки выработанного пространства (сплошная линия) и с закладкой (пунктирная линия). В случае с пунктирной линией диаграммы нагружения ни одна из линий неразрывности не является касательной к ниспадающей ветви диаграммы нагружения, что указывает на отсутствие опасной ситуации. Это одно из радикальных мероприятий предотвращения разрушения целиков в динамическом режиме.

Эффект заключается в том, что в зависимостях (1), (2) при условии закладки вместо  $h$  принимается  $(h - h_3)$ , т.е. величина (высота) целика, не подкрепленная закладкой. Чем больше полнота закладки выработок, тем меньше вероятность хрупкого разрушения пород. Из этого следует вывод: получаемое расчетным путем значение предельного пролета выработанного пространства, согласно формулам (6), (7), является расстоянием  $L$  от линии фронта очистных работ, с которого необходимо обязательно начинать закладку выработанного пространства.

#### Заключение

По представленной методике можно для конкретных горно-геологических и горнотехнических условий определить критические значения природного фактора — модуля упругости и горнотехнического фактора — предельного размера незаложенного выработанного пространства, влияющих на вероятную возможность хрупкого разрушения пород целиков.

#### Список литературы

1. *Методологические основы расчета разделительных целиков и определение удароопасных ситуаций при разработке пластообразных залежей/* К.Н. Трубецкой, Д.М. Бронников, С.В. Кузнецов, В.А. Трофимов// Горный вестник. — 1995. — № 4. — С. 12–21.
2. *Петухов И.М., Линьков А.М.* Механика горных ударов и выбросов. — М.: Недра, 1983. — 175 с.
3. *Глушко В.Т., Виноградов В.В.* Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. — М.: Недра, 1982. — 193 с.
4. *Лантев Б.В.* Об удароопасности соляных пород Верхнекамского месторождения// Безопасность труда в промышленности. — 2001. — № 5. — С. 29–31.

[laptevbv@mail.ru](mailto:laptevbv@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 21 августа 2017 г.

«Bezопасnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2017, № 10, pp. 22–25.  
DOI: 10.24000/0409-2961-2017-10-22-25

**Assessment of Pillars Hazard on Dynamic Destruction in the Developed Space of the Salt Mines**

**Information about the Author**

**B.V. Laptsev**, Dr. Sci. (Eng.), Senior Researcher, laptsev@mail.ru  
STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia

**Abstract**

According to the methods stated in the Methodological basis of calculation of separation pillars and identification of the bump hazardous situations when developing blanket deposits, two mining situations are considered, and the degree of hazard of the separation (barrier) pillars, and the pillars adjoining the frontal line of the second working is assessed. With regard to the considered conditions, for example, of the Verkhnekamsk potash mines, the required assumption (condition) is that all the other pillars, except for the

considered, in the developed space at a certain section have to transfer to an out-of-limit state, they shall not have the bearing capacity, and the roof rocks over the developed bed — hang.

**Key words:** brittle failure of rocks in the dynamic form, mechanical natural parameters of rocks, mine technical factors, multiple-factor regressive analysis, flushing of workings.

**References**

1. Trubeckoj K.N., Bronnikov D.M., Kuznecov S.V., Trofimov V.A. Methodological basis of calculation of separation pillars and identification of the bump hazardous situations when developing blanket deposits. *Gornyy vestnik = Mining Bulletin*. 1995. № 4, pp. 12–21.
2. Petuhov I.M., Linkov A.M. *Mehanika gornyyh udarov i vybrosov* (Mechanics of Rock Bumps and Outbursts). Moscow: Nedra, 1983. 175 p.
3. Glushko V.T., Vinogradov V.V. *Razrushenie gornyyh porod i prognozirovaniye projavlenij gornogo davleniya* (Destruction of Rocks and Forecasting of Manifestations of Rock Pressure). Moscow: Nedra, 1982. 193 p.
4. Laptsev B.V. On the rock-bump hazard of the saliferous rocks at the Verkhnekamsk deposit. *Bezопасnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2001. № 5. pp. 29–31.

**По страницам научно-технических журналов** октябрь 2017 г.

**Горный журнал**

(научно-технический и производственный журнал)

**Определение границ безопасных зон выбросоопасных пластов по радиационной температуре поверхности угольного массива/ В.В. Николин, А.Н. Шабаров, Г.И. Коршунов и др. — 2017. — № 8.**

Рассмотрены этапы использования температурного показателя в качестве критерия оценки газодинамического состояния призабойной части пласта. Вскрыта физическая сущность изменения температуры поверхности забоя пласта. Приведены результаты шахтных экспериментальных исследований и выполнен их обобщенный анализ. Даны предложения по практическому применению данного способа для оценки границ как безопасных зон, так и зон повышенной опасности.

**Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов**  
(специализированный научный журнал)

**Влияние напряженно-деформированного состояния на предельное состояние трубопровода/ Ю.В. Лисин, С.В. Эрмиш, Н.А. Махутов и др. — 2017. — № 4.**

Проведен анализ нормативного подхода к оценке прочности трубопроводов (с использованием расчетных напряжений). Развита уточненный расчетный подход, учитывающий в явном виде стадии упругого и упругопластического деформирования и влияние напряженного состояния на особенности достижения предельных состояний при разрушении. Проведен анализ влияния объемного напряженного состояния на изменение сопротивления образованию пластических деформаций с помощью коэффициента повышения первого главного напряжения при выполнении условия начала пластического деформирования. Изучено влияние второго главного растягивающего напряжения на снижение разрушающих (предельных) деформаций.

**Об алгоритме идентификации скорости распространения возмущений в магистральном трубопроводе и особенностях его реализации/ Р.З. Сунагагуллин, А.В. Кудрицкий, И.С. Симонов и др. — 2017. — № 4.**

Разработан алгоритм идентификации значения скорости распространения волн давления на линейной части магистрального нефтепровода (МН). Алгоритм основан на анализе показаний последовательно расположенных датчиков давления и идентификации фронтов давления, возникающих при переходных режимах работы МН. В работе приведено подробное описание алгоритма, представлены результаты применения разработанного алгоритма на участках МН ПАО «Транснефть».

**Комарица В.Н., Сухорукова Н.Н. Исследования механики деформаций и разрушений и некоторые вопросы обеспечения безопасности и надежности трубопроводов с учетом особенностей технологического процесса. — 2017. — № 4.**

Представлены результаты зарубежных исследований в области материаловедения и механики взаимодействия инженерных конструкций, а также статьи по вопросам обеспечения безопасности и надежности трубопроводов с учетом особенностей технологического процесса и конструкции объекта.

**Обеспечение безопасности работы при подготовке сырого газа методом низкотемпературной сепарации/ В.Р. Галлямов, А.В. Колчин, Н.В. Вадулина и др. — 2017. — № 4.**

Рассматривается перспективная сверхзвуковая технология с точки зрения модернизации существующих установок комплексной подготовки газа низкотемпературной сепарацией, основанная на использовании изоэнтальпийного расширения с последующим изоэнтальпийным сжатием газового потока вместо классического изоэнтальпийного охлаждения. Для анализа сопла реализована математическая модель сверхзвукового сопла. Для обеспечения безаварийной эксплуатации рассматриваемой технологии был осуществлен расчет толщины стенки исходя из нагрузок, действующих на профиль, вызванных давлением среды внутри сопла, а также напряжений в металле от перепада температур.