

# Сохранение целика и подготовительного штрека за счет разупрочнения кровли вышележащей лавы направленным гидроразрывом\*

DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-4-23-30>

Рассмотрены метод направленного гидроразрыва (НГР) труднообрушающейся кровли и средства его реализации из подготовительных выработок угольных шахт. Методом конечных элементов приведены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния горной породы при ведении очистных работ на сближенных угольных пластах XVI и XVII в условиях шахты им. Ленина. Установлено влияние горного давления на целик и подготовительные выработки нижележащего сближенного пласта при разработке вышележащего угольного пласта очистным забоем. Показана необходимость разупрочнения кровли направленным гидроразрывом вышележащего пласта для ликвидации нагрузок на целик и подготовительный забой нижележащего пласта. Разработаны технологические схемы и проведены шахтные мероприятия по посадке кровли в вышележащей лаве, что позволило снизить нагрузку на целик нижележащего пласта XVII, устранить разрушение угля в целике и выполнить подготовительные работы с заданным паспортом крепления.

**Ключевые слова:** подземная разработка месторождений, сближенные пласты, труднообрушающиеся кровли, направленный гидроразрыв, щелеобразователь, герметизатор, численное моделирование, метод конечных элементов, технологическая схема, шахтные испытания.

**Для цитирования:** Сохранение целика и подготовительного штрека за счет разупрочнения кровли вышележащей лавы направленным гидроразрывом / В.И. Клишин, Г.Ю. Опрук, В.А. Гоголин и др. // Уголь. 2023. № 4. С. 23-30. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-4-23-30.

## ВВЕДЕНИЕ

При выемке угля из пластов, склонных к горным ударам и внезапным выбросам угля и газа, зависание труднообрушающейся кровли увеличивает напряжения в краевой части пласта, чем провоцирует и вызывает динамические и газодинамические явления. Кроме того, зависание кров-

## КЛИШИН В.И.

Доктор техн. наук, профессор, член-корр. РАН, директор Института угля ФИЦ УУХ СО РАН, 650065, г. Кемерово, Россия, e-mail: [klishinvi@icc.kemsc.ru](mailto:klishinvi@icc.kemsc.ru)

## ОПРУК Г.Ю.

Канд. техн. наук, заведующий лабораторией «Эффективные технологии разработки угольных месторождений» Института угля ФИЦ УУХ СО РАН, 650065, г. Кемерово, Россия, e-mail: [opruk@yandex.ru](mailto:opruk@yandex.ru)

## ГОГОЛИН В.А.

Доктор техн. наук, профессор КузГТУ им. Т.Ф.Горбачева, 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: [eia.pt@kuzstu.ru](mailto:eia.pt@kuzstu.ru)

## СВЯЗЕВ С.И.

Старший инженер Института угля ФИЦ УУХ СО РАН, 650065, г. Кемерово, Россия



\* Исследование выполнено в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 № 1144-р (Соглашение № 075-15-2022-1191).

ли вызывает концентрацию горного давления на угольный массив в зоне очистного забоя и на сопряжениях его с горными выработками, что провоцирует горный удар. В таких условиях целики и охраняемые подготовительные выработки подвергаются действию высокого опорного давления за счет зависания кровли на значительной площади. Это приводит к разрушению горных выработок и, соответственно, к нарушению нормального режима работы добычного транспорта и проветривания забоев. Неожиданные неуправляемые динамические обрушения горного массива наносят большой вред – опасны для людей, разрушают механизмы и горные выработки. Кроме этого, зависания кровли вызывают концентрацию горного давления на угольный массив в зоне очистного забоя и на сопряжениях его с горными выработками, что провоцирует внезапный выброс угля и газа [1, 2, 3, 4]. В последние несколько десятилетий динамические обрушения прочной кровли произошли более чем в 100 угольных шахтах Китая, что привело к многочисленным травмам, несчастным случаям со смертельным исходом, к разрушению выработок и оборудования [5, 6]. В Австралии для управления такими кровлями [7, 8] применяют гидрорасчленение горного массива путем бурения и обсадки скважины с поверхности.

Этого могло не произойти в случае своевременного искусственного обрушения основной кровли – принудительной ее посадки. Существующие методы разупрочнения труднообрушающихся пород, разработанные в 1990-х годах (передовое торпедирование, гидромикроторпедирование и т.д.), несмотря на опытную длительную проверку, не дают в большинстве случаев положительных результатов.

### МЕТОД НАПРАВЛЕННОГО ГИДРОРАЗРЫВА КРОВЛИ

Для предотвращения динамических явлений в шахтах предложен уникальной безвзрывной метод направленного гидроразрыва пород (НГР) [2, 3, 9]. Для выполнения, направленного гидроразрыва в массиве кровли (рис. 1, а) в стенках восстающих скважин, ориентированных нормально слоистости, с помощью специального инструмен-

та нарезают иницирующую щель заданной формы и размеров, являющуюся концентратором напряжений. Затем щель герметизируют упруго-расширяющимся рукавом и в нее нагнетают насосом 7 по трубопроводам 1, 5 в режиме гидроразрыва жидкость.

В результате хрупкого разрыва происходит рост щели в заданном направлении. Для осадочных пород прочность на разрыв в направлении по слоистости наименьшая. Поэтому условие для распространения щели по слоистости является наиболее благоприятным. Расслоение монолитной кровли может быть осуществлено на одном, двух и более уровнях (в зависимости от количества иницирующих щелей, создаваемых в скважине).

Для бурения скважин используются породные коронки диаметром 46 мм с устройством зачистки шпура – «паук». Перечисленные технологические процессы осуществляются с использованием как стандартного оборудования общего назначения, так и узкоспециального. К оборудованию общего назначения относятся буровые сверла и нагнетательные установки (высоконапорные насосы, маслостанции механизированных комплексов), к специальному – щелеобразователь (инструмент для прорезания иницирующих щелей на стенках скважин (см. рис. 1, б) и пакер-герметизатор зоны иницирующей щели «Таурус» (см. рис. 1, в). Досылка герметизатора к забою восстающих пластов производится при помощи специального комплекта высоконапорных труб. Соединение нагнетательной установки с выступающим из скважины концом труб осуществляется через специальный переходник (коллектор) посредством высоконапорных гибких шлангов.

После образования трещин в скважине на направление распространения последующих гидравлических трещин в основном влияет региональное поле напряжений земной коры, которое может вызывать пространственное отклонение гидравлических трещин. Влияние искусственно созданной трещины, закон ее распространения, а также оценка результатов изменения напряженно-деформированного состояния массива нуждаются в продолжении дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

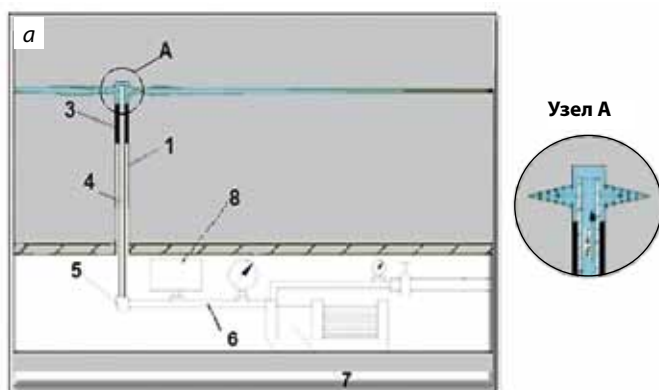


Рис. 1. Схема расположения технологического оборудования (а): 1 – шпур, 2 – иницирующая щель, 3 – пакер, 4 – высоконапорные трубы, 5 – коллектор, 6 – соединительные рукава, 7 – насос, 8 – измерительная аппаратура и применяемое оборудование: щелеобразователь (б), пакер-герметизатор неуравновешенный (Таурус) с клапаном (в)

Fig. 1. Layout of technological equipment (а): 1 – borehole; 2 – initiation slot; 3 – packer; 4 – high-pressure pipes; 5 – manifold; 6 – connecting hoses; 7 – pump; 8 – measuring instruments and equipment used: splitter (б), unbalanced sealing packer (Taurus) with valve (в)

Разработаны технологические схемы по применению направленного гидроразрыва для разупрочнения кровли в монтажной и демонтажной камерах, для сохранения повторно используемых выработок и снижения нагрузок на угольные целики, а также для ликвидации пучения почвы горных выработок. Разработанный метод НГР кровли в различных традиционных технологических схемах получает все большее распространение на шахтах Кузбасса [2, 3, 9, 10, 11]. После реализации метода в условиях шахты Покуй (Мир) в Польше [9] он внедряется как метод борьбы с горными ударами [12]. Это позволило и китайским специалистам начать внедрение метода НГР на шахтах Китая [13, 14, 15].

### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

При отработке сближенных угольных пластов в условиях труднообрушаемых кровель их зависание в выработанном пространстве вызывает не только динамические явления при посадке кровли, но и создает резкое увеличение затрат на поддержание и безопасное ведение подготовительных выработок, происходящих в зоне их влияния, например на нижележащих пластах, как это было выявлено во Вьетнаме [16]. Аналогичная ситуация возникла в настоящее время на шахте им. Ленина, где подготовительные работы по нижележащему пласту XVII отстают от очистных работ по вышележащему пласту XVI (рис. 2).

Учитывая, что скорость подготовительных работ значительно превышает скорость очистных работ, подготовительные выработки по пласту окажутся в зоне влияния опорного давления пласта XVI. Снижение затрат на проходку и поддержание подготовительной выработки нижележащего угольного пласта предложено обеспечить за счет снижения зависания кровли в выработанном пространстве вышележащей лавы. Осуществление разгрузки горного массива в подготовительной выработке нижележащей лавы пласта XVII предложено осуществить методом НГР зависающих труднообрушающихся кровель из подготовительной выработки действующей вышележащей лавы по пласту XVI с некоторым опережением относительно очистного забоя.

Вышележащий пласт XVI отрабатывается лавой № 0-16-10 с некоторым опережением двигающегося по нижележащему пласту XVII вентиляционного штрека лавы № 0-17-14. Наличие прочной кровли непосредственно над пластом XVI, позволяет предположить, что в зоне опорного давления краевые части вентиляционного штрека № 0-16-12 и конвейерного штрека № 0-16-10 будут испытывать повышенные нагрузки от консоли основной кровли. В нижерасположенном пласте XVII проходит с некоторым отставанием вентиляционный штрек лавы № 0-17-14, который в течение месяца окажется в зоне влияния вентиляционного штрека лавы № 0-16-12, отрабатываемой по вышележащему пласту XVII. В данной ситуации предложено осуществлять разгрузку крепи от высоких горизонтальных напряжений и изгибающих нагрузок с помощью искусственно созданных ориентированных трещин методом НГР. Это позволит изменить направление действия наибольшего усилия от горного давления на крепь механизированного комплекса, которое будет направлено

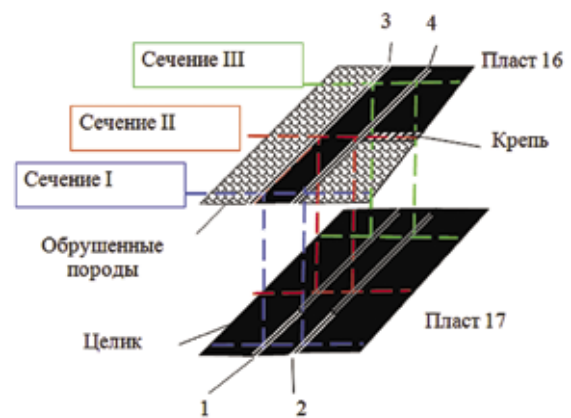


Рис. 2. Состояние горных работ по пластам XVI и XVII:

1 – вентиляционный штрек (ВШ) 0-17-14;

2 – вентиляционный штрек (ВШ) 0-17-12;

3 – вентиляционный штрек (ВШ) 0-16-12;

4 – конвейерный штрек (КШ) 0-16-10

Fig. 2. Progress of mining operations in Seams XVI and XVII:

1 – ventilation drift (VD) 0-17-14; 2 – ventilation drift (VD) 0-17-12;

3 – ventilation drift (VD) 0-16-12; 4 – conveyor drift (CD) 0-16-10

в сторону завала, а также снизить нагрузки на вентиляционный штрек нижерасположенной лавы № 0-17-14. Этим обеспечивается «сток» энергии от действующих сил в заданном направлении, т.е. перераспределение направления действия сил. Использование направленного гидроразрыва позволит осуществить обрыв консоли кровли над угольным массивом в период отработки выемочного участка 0-16-12 пласта XVI.

Для выяснения геомеханического и прочностного состояния межлавного целика по пласту XVII рассмотрим **три вертикальных сечения** рассматриваемых пластов, параллельных линии очистных работ (см. рис. 1). **Сечение I**, в котором целик по пласту XVII находится в области влияния выработанных пространств пласта XVI (см. рис. 2), (рис. 3, а, б).

Основными блоками расчетной области являются: вмещающие породы 1, угольные пласты 2 с выделенными межлавыми целиками 3 и обрушенные породы 4 выработанных пространств пласта XVI. Размеры расчетной области составляют 140 м по горизонтали и 100 м по вертикали. Мощность пласта XVI составляет 1,5 м, пласта XVII – 3,0 м, междупластья – 8 м. Высота блока обрушенных пород принимается равной пятикратной мощности вынимаемого пласта. Угол наклона блока обрушенных пород соответствует углу откоса и составлял 42°. Положение координатных осей изображено на рис. 3, а.

Все блоки приняты линейно-деформируемыми со значениями модуля линейных деформаций  $E$ , коэффициента поперечных деформаций  $\nu$ , прочностью пород на одноосное сжатие  $\sigma_{сж}$  и объемной массой  $\rho$ , представленными в таблице с использованием данных [17].

В выбранном сечении реализуется плоско-деформированное состояние массива горных пород со следующими граничными условиями. На всех границах области отсутствуют касательные напряжения. На вертикальных границах нормальные перемещения равны нулю, так же, как и на нижней горизонтальной границе. Верхняя

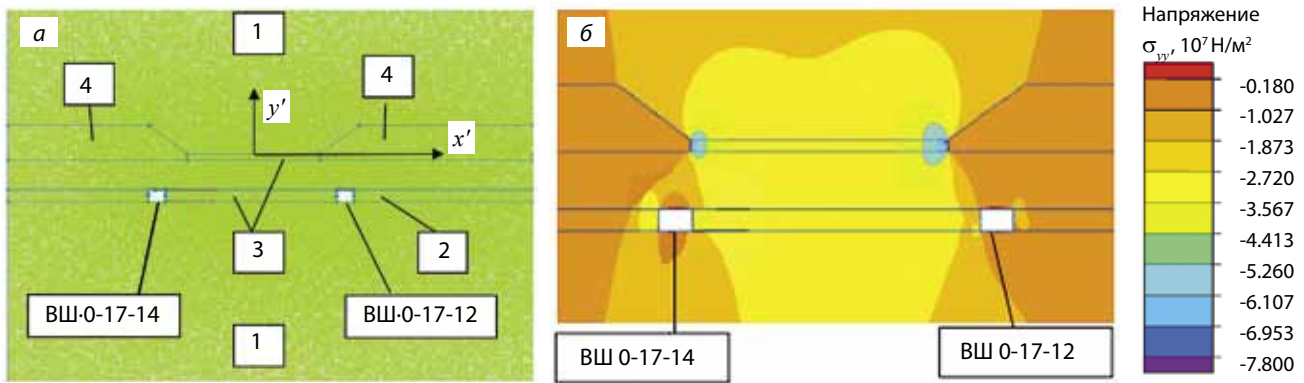


Рис. 3. Сечение I и его расчетная область (а): 1 – вмещающие породы; 2 – угольный пласт XVII; 3 – межлавные целики; 4 – обрушенные породы. Поле вертикальных напряжений в сечении I (б)

Fig. 3. Section I and its calculated area (a): 1 – host rocks; 2 – coal seam XVII; 3 – interwall pillars; 4 – collapsed rocks. Vertical stress field in Section I (б)

**Характеристики блоков модели**

Блок	E, МПа	ν	σ <sub>сж</sub> , МПа	ρ, т/м <sup>3</sup>
Вмещающие породы	10 <sup>4</sup>	0,2	60-100	2,55
Пласт XVI	10 <sup>4</sup>	0,25	7,2	1,31
Пласт XVII	10 <sup>4</sup>	0,25	11,5	1,32
Обрушенные породы	10 <sup>4</sup>	0,3	60	2,0

граница нагружена вертикальным давлением, соответствующим весу вышележащей кровли с учетом глубины залегания пласта XVI (470 м). Все блоки расчетной области нагружены объемной силой, соответствующей объемной массе блока.

Решение рассматриваемых задач выполнялось численным методом конечных элементов [18] по лицензионной программе «ELCUT». Число узлов сетки конечных элементов составляло порядка 150000, то есть более 10 узлов на квадратный метр расчетной области. Удвоение числа узлов сетки приводило к изменению значений напряжений не более чем на 6%. На рис. 3, б показано распределение вертикальных напряжений в сечении I. В проведенных расчетах сжимающие напряжения приняты отрицательными.

Условие прочности горных пород Мора в главных напряжениях имеет вид [19]:

$$\sigma_{Mo} = \sigma_1 - \frac{\sigma_p}{\sigma_{сж}} \cdot \sigma_3 < \sigma_p,$$

где  $\sigma_1, \sigma_3$  – наибольшее и наименьшее главное напряжение;  $\sigma_p, \sigma_{сж}$  – пределы прочности породы на растяжение и на сжатие.

Таким образом, если  $\sigma_{Mo} > \sigma_p$ , то происходит нарушение прочности горной породы. Вмещающие породы имеют средний предел прочности на сжатие, равный 80 МПа. Прочностное состояние блоков оценивалось по критерию Мора с учетом отношения пределов прочности пород и угольных пластов на растяжение к пределу прочности на сжатие 1:10 [17]. Значения критерия Мора в сечении I больше, чем 80 МПа, показаны красным цветом (рис. 4), в областях которого вмещающие породы теряют прочность (разупрочняются).

В областях фиолетового и желтого цвета вмещающие породы сохраняют свою прочность. Зоны разупрочнения

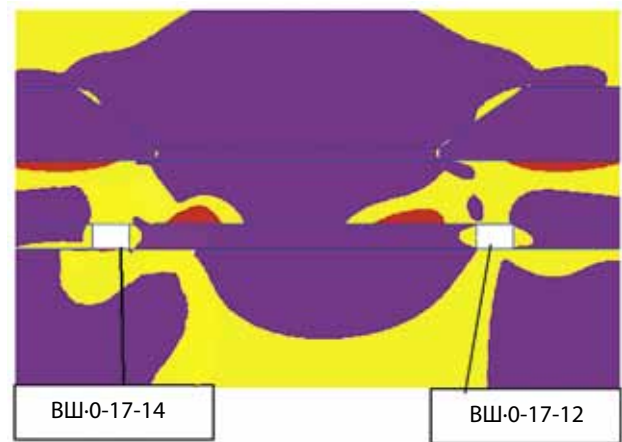


Рис. 4. Распределение значений критерия Мора в блоках вмещающих пород в сечении I

Fig. 4. Distribution of the Mohr criterion values in the blocks of host rocks in Section I

блоков вмещающих пород приурочены к верхней границе расчетной области и границам обрушенных пород. Аналогичные расчеты были проведены для оценки прочности межлавного целика пласта XVII с пределом прочности на сжатие, равным 11,5 МПа. Критическое значение критерия Мора, при котором происходит разрушение целика, было принято равным  $1,15 \cdot 10^6$  Па (рис. 5).

В сечении I целик пласта XVII сохраняет свою прочность там, где значения критерия Мора составляют менее чем  $1,15 \cdot 10^6$  Па (целик показан желтым и фиолетовым цветом) (см. рис. 5, а). Красным цветом выделены зоны разупрочнения целика, прилегающие к штрекам. Однако в этих зонах предусмотрено крепление боков штреков, которое позволяет устранить разупрочнение угля.

**В сечении II целики попадают в зону влияния механизированной крепи** (см. рис. 2). В расчетной области механизированной крепи задавался отпор крепи на кровлю и почву очистной выработки, равный рабочему сопротивлению крепи 1 МПа (рис. 6, а).

Увеличение вертикальных напряжений происходит в областях, примыкающих к штрекам пласта XVI (см. рис. 6, б).

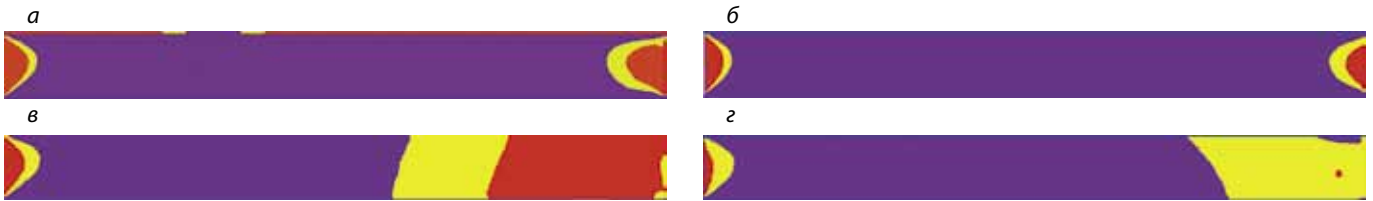


Рис. 5. Распределение значений критерия Мора в межлавном целике пласта XVII: а – в сечении I, б – в сечении II, в – в сечении III, г – сечение III после реализации НГР

Fig. 5. Distribution of the Mohr criterion values in the interwall pillar of Seam XVII: а – in Section I, б – in Section II, в – in Section III, г – Section III upon application of the directional hydraulic fracturing

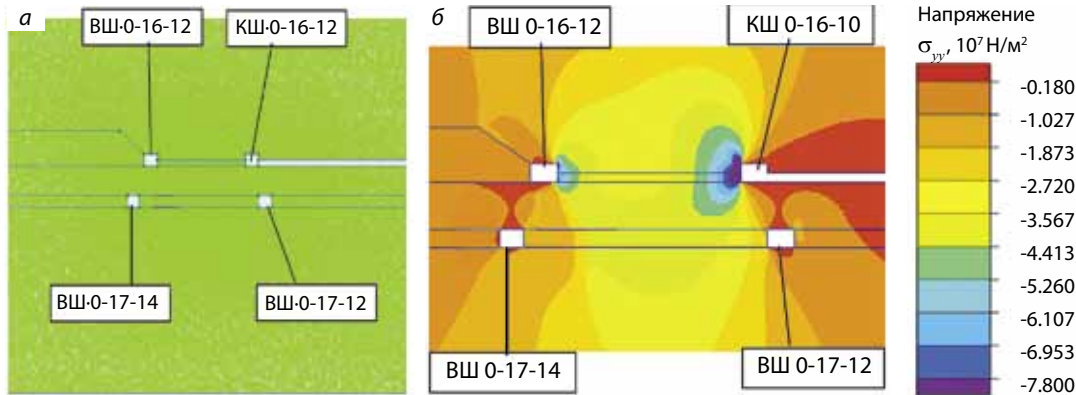


Рис. 6. Расчетная область в сечении II (а), распределение вертикальных напряжений в сечении II (б)

Fig. 6. Calculated area in Section II (а), distribution of vertical stresses in Section II (б)

Распределение значений критерия Мора в межлавном целике пласта XVII в сечении II (см. рис. 5, б) свидетельствует, что межлавный целик пласта XVII сохраняет свою прочность так же, как и в сечении I.

**В сечении III межлавный целик пласта XVII попадает в зону влияния опорного давления очистных работ по вышележащему пласту XVI** (см. рис. 2). В расчетной области при оценке прочностного состояния целика пласта XVII темным блоком 1 представлена призабойная часть отработываемого угольного пласта XVI по длине выемочного столба (рис. 7, а). На верхней и нижней границах этого блока задавались наибольшие вертикальные смещения кровли и почвы в зоне опорного давления.

Для нахождения этих величин была решена вспомогательная задача определения максимального смещения кровли в зоне опорного давления  $v_{кр}$ , вызванного ведением очистных работ в сечении лавы № 0-16-12 по простиранию пласта. Они определялись как разность полных ( $v_1$ ) и начальных ( $v_0$ ) смещений в нетронутым массиве горных по-

род. В рассматриваемом случае  $v_{кр} = v_1 - v_0 = -0,505 - 0,458 = -0,047$  м. Аналогично были найдены максимальные смещения почвы в зоне опорного давления, которые составили:  $v_n = -0,035$  м. Эти значения смещений кровли и почвы являлись граничными условиями в призабойной части 1 пласта XVI по длине выемочного столба (см. рис. 7, а). Распределение вертикальных напряжений в сечении III представлено на рис. 7, б. При этом при расчете распределения значений критерия Мора в межлавном целике пласта XVII выявляется критическое значение предела прочности на сжатие пласта XVII, превышающее 11,5 МПа (см. рис. 5, в). Зона разупрочнения длиной около 9 м наблюдается в правой части целика пласта XVII, испытывающей влияние опорного давления отработываемой лавы пласта XVI. Нагрузка на 1 м целика составила  $5,2 \cdot 10^5$  Кн.

Для устранения негативного влияния опорного давления на межлавный целик в сечении III рассмотрено применение направленного гидроразрыва (НГР). Гидравлический разрыв пород кровли моделировался щелью 1

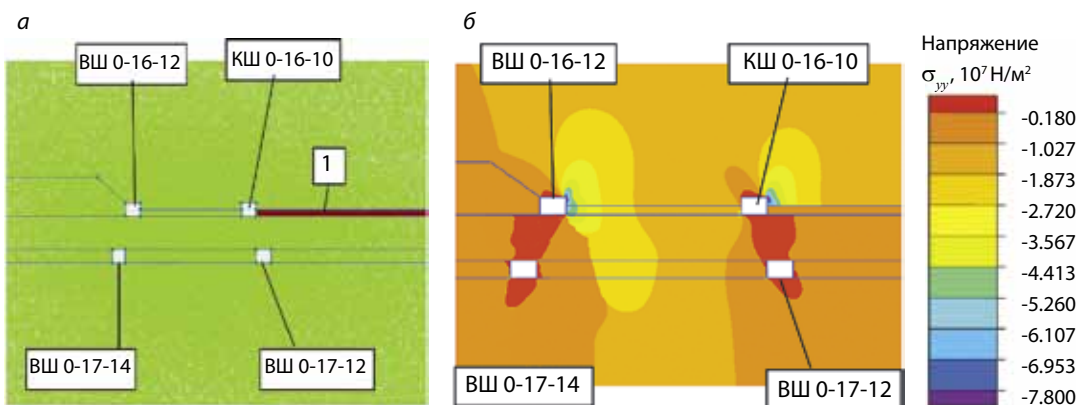


Рис. 7. Расчетная область в сечении III (а): 1 – призабойная часть отработываемого угольного пласта XVI; поле вертикальных напряжений в сечении III (б)

Fig. 7. Calculated area in Section III (а): 1 – near-face part of the mined-out coal seam XVI; field of the vertical stresses in Section III (б)

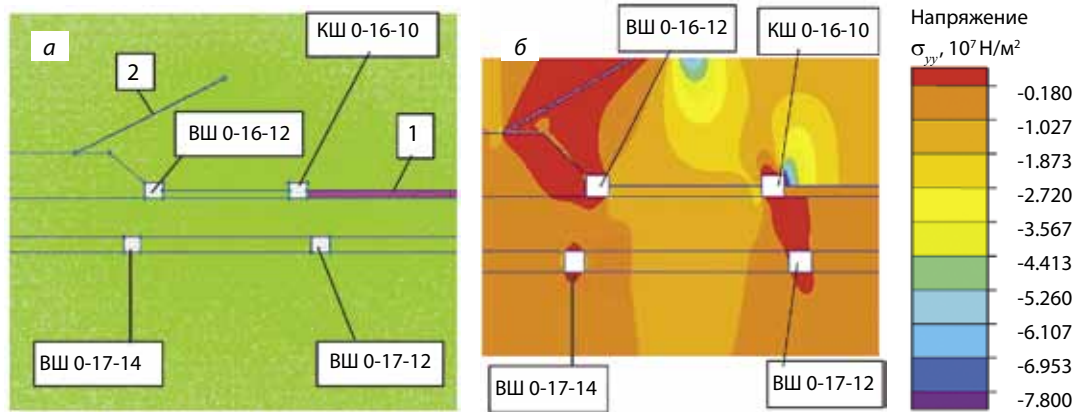


Рис. 8. Расчетная область в сечении III с применением НГР (а): 1 – призабойная часть отработываемого угольного пласта XVI; 2 – цель гидроразрыва; поле вертикальных напряжений в сечении III с применением НГР (б)  
 Fig. 8. Calculated area in Section III with application of the directional hydraulic fracturing (a): 1 – near-face part of the mined-out coal seam XVI; 2 – the hydrofrac split; field of the vertical stresses in Section III with application of the directional hydraulic fracturing (b)

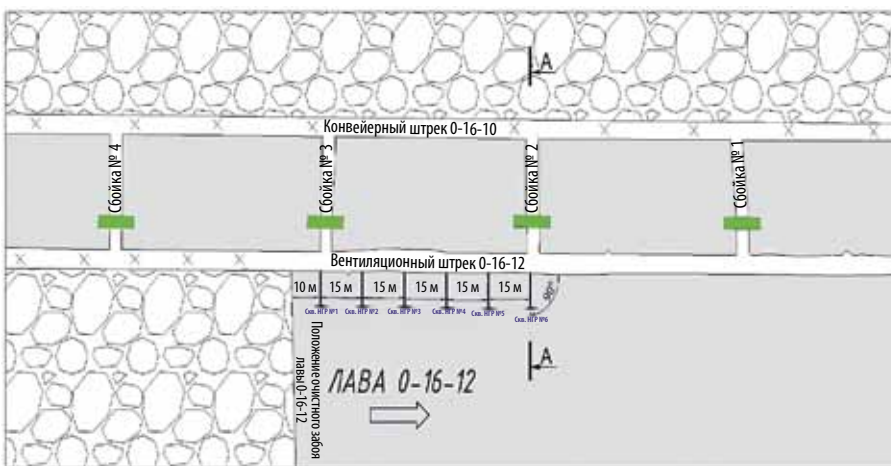


Рис. 9. Технологическая схема расположения скважин для реализации метода НГР в период отработки выемочного столба 0-16-12  
 Fig. 9. Technological plan of borehole arrangement for implementation of the directional hydraulic fracturing method when mining Extraction Pillar 0-16-12

(рис. 8). Положение и размеры разрыва приняты в соответствии с [2, 3]. Длина разрыва – 35 м, угол наклона к горизонту – 28°.

Применение НГР позволяет изменить поле вертикальных напряжений, что влияет на разупрочнение межлавого целика пласта XVII (рис. 8, б). При этом распределение значений критерия Мора в межлавом целике пласта XVII соответствует критическому значению предела прочности на сжатие пласта XVII, равному 11,5 МПа (рис. 5, з). В целике не образуются области, в которых наблюдается превышение критического значения критерия Мора. Нагрузка на 1 м целика составила  $3.9 \cdot 10^5$  Кн.

### ШАХТНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Выполненные расчеты позволили перейти к проведению на шахте им. Ленина мероприятий по проведению направленного гидроразрыва пород основной кровли пласта XVI лавы № 0-16-12 для снижения проявления повышенного горного давления в предохранительном целике и подготовительных забоях пласта XVII нижележащей лавы. Общий вид технологической схемы и места заложения скважин для осуществления направленного гидроразрыва пород представлен на рис. 9, 10. Скважины с углом наклона 60°, пробуренные из вентиляционного штрека

№ 0-16-12, обеспечивают отсечение пород основной кровли и ликвидацию ее зависания на угольном массиве.

Места заложения и параметры скважин выбирались в каждом конкретном случае с учетом полученных результатов в зависимости от горно-геологических и горнотехнических условий на участке, предназначенном к разупрочнению. В процессе выполнения мероприятий, в зависимости от конкретных условий и получаемых результатов, схема и параметры заложения рабочих скважин корректировались.

### ВЫВОДЫ

В соответствии с горно-геологическими условиями выполнен расчет горизонтальных напряжений, действующих на целик и подготовительные выработки нижележащего пласта XVII при отработке очистным забоем вышележащего пласта XVI. Рассмотрены три вертикальных сечения рассматриваемых пластов, параллельных нахождению линии очистных работ. Показано, что при приближении межлавого целика пласта XVII и подготовительного забоя в зону влияния опорного давления очистных работ по вышележащему пласту XVI, выявляются критические значения предела прочности на сжатие пласта XVII, превышающие допустимые с зоной распространения око-

ло 9 м. Установлено, что применение НГР позволяет снизить нагрузку на целик пласта XVII на 25%, устранить разупрочнение угля в целике и выполнить подготовительные работы с заданным паспортом крепления подготовительных выработок.

Экспериментально доказано, что осуществление разгрузки горного массива в подготовительной выработке нижележащей лавы пласта XVII методом НГР зависающих труднообрушающихся кровель из подготовительной выработки действующей вышележащей лавы по пласту XVI с некоторым опережением относительно очистного забоя позволило осуществить проходку и крепление подготовительной выработки в нижележащей лаве пласта XVII. Это позволило изменить направление действия наибольшего усилия от горного давления на крепь механизированного комплекса в сторону завала, а также снизить нагрузки на вентиляционный штрек нижерасположенной лавы № 0-17-14. Использование направленного гидроразрыва позволило осуществить обрыв консоли кровли над угольным массивом в период отработки выемочного участка 0-16-12 пласта XVI.

### Список литературы

1. Охрана подготовительных выработок целиками на угольных шахтах / В.Б. Артемьев, Г.И. Коршунов, А.К. Логинов и др. СПб.: Наука; 2009. 229 с.
2. Труднообрушаемые кровли: проблемы и решения для механизированных забоев современного технического уровня угольных шахт / В.И. Клишин, В.В. Рашевский, В.Б. Артемьев и др. М.: Горное дело; ООО «Киммерийский центр», 2016. 480 с.
3. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений / В.И. Клишин, Л.В. Зворыгин, А.В. Лебедев и др. Новосибирск: Издательский дом «Новосибирский писатель», 2011. 524 с.
4. Оганесян С.А. Авария в Филиале «Шахта Тайжина» ОАО ОУК «Юж-кузбассуголь» – хроника, причины, выводы // Уголь. 2004. № 6. С. 25-28.
5. Li T., Cai M.F., Cai M. A review of mining-induced seismicity in China // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2007; 44(8): 1149-1171.
6. Gao M.-S. Prevention and forecasting of rock burst hazards in coal mines / L.-M. Dou, C.-P. Lu, Z.-L. Mu et al. // Mining Science and Technology (China). 2009; 19(5): 585-591.
7. Monitoring and Measuring Hydraulic Fracturing Growth During Preconditioning of a Roof Rock over a Coal Longwall Panel / R.G. Jeffrey, Z. Chen, K. Mills et al. In book: Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing. 2013. P. 893-914. DOI: 10.5772/45724.
8. Measurement and Analysis of Full-Scale Hydraulic Fracture Initiation and Reorientation / R.G. Jeffrey, Z.R. Chen, X. Zhang et al. // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2015. No 48. P. 2497-2512.

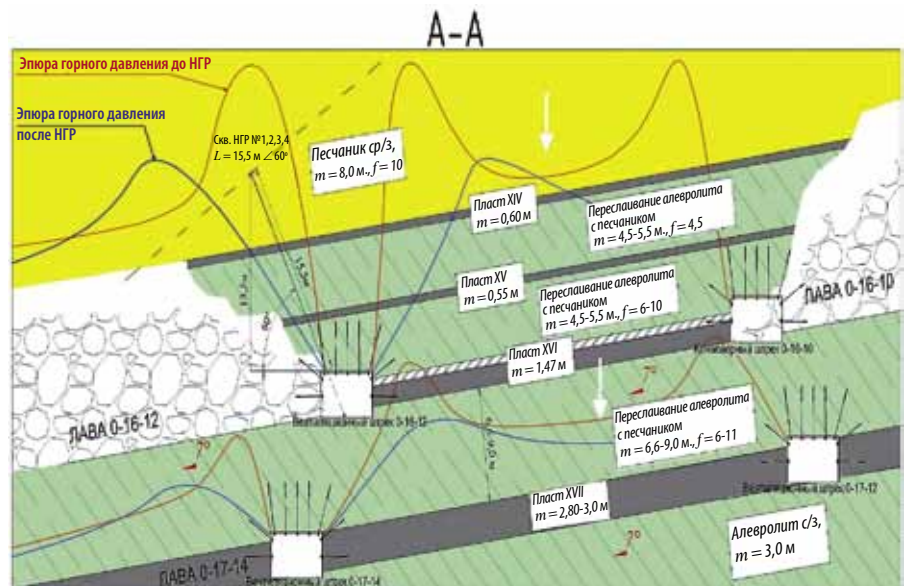


Рис. 10. Вертикальная схема расположения шпуров для реализации метода НГР из вентиляционного штрека № 0-16-12 в период отработки выемочного столба 0-16-12

Fig. 10. Vertical plan of borehole arrangement for implementation of the directional hydraulic fracturing method from the ventilation drift 0-16-12 when mining Extraction Pillar 0-16-12

9. Клишин В.И. Адаптация механизированных крепей к условиям динамического нагружения. Новосибирск: Наука, 2002. 200 с.
10. Реализация метода направленного гидроразрыва (НГР) при решении геотехнологических задач управления повышенным горным давлением / В.И. Клишин, Г.Ю. Опрук, А.С. Телегуз и др. // Уголь. 2021. № 11. С. 6-12. DOI: 10.18796/0041-5790-2021-11-6-12.
11. Разупрочнение труднообрушаемой кровли методом направленного гидроразрыва (НГР) на этапе выхода механизированного комплекса из монтажной камеры / В.И. Клишин, Г.Ю. Опрук, А.Ф. Салихов и др. // Уголь. 2020. № 11. С. 4-8. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-11-4-8.
12. Джевецки Ян. Новые методы предотвращения опасности горных ударов // Глюкауф. 2002. № 2.
13. Liu J., Liu C., Li X. Determination of fracture location of double-sided directional fracturing pressure relief for hard roof of large upper goaf-side coal pillars // Energy Exploration & Exploitation. 2020. Vol. 38. No. 1. P. 111-136.
14. Huang B., Zhao X., Ma J. et al. Field experiment of distress hydraulic fracturing for controlling the large deformation of the dynamic pressure entry heading adjacent to the advancing longwall face // Archives of Mining Sciences. 2019. Vol. 64. No. 4. P. 829-848.
15. Deephole directional fracturing of thick hard roof for rockburst prevention / Hu He, Linming Dou, Jun Fan et al. // Tunneling and Underground Space Technology. 2012. Vol. 32. P. 34-43.
16. Зубов В.П., Ле Куанг Фук. Разработка ресурсосберегающей технологии выемки пологих угольных пластов с труднообрушающимися породами кровли (на примере шахт Куангниньского угольного бассейна) // Записки Горного института. 2022. Т. 257. С. 795-806. DOI: 10.31897/PMI.2022.72.
17. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна. Справочник / Г.Г. Штумпф, Ю.А. Рыжков, В.А. Шаламанов и др. М.: Недра, 1994. 447 с.
18. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975.
19. Разрушение. Т. 2. М.: Мир, 1975. 764 с.

Original Paper

UDC 622.245:539.3 © V.I. Klishin, G.Yu. Opruk, V.A. Gogolin, S.I. Svyazev, 2023  
 ISSN 0041-5790 (Print) • ISSN 2412-8333 (Online) • Ugol' – Russian Coal Journal, 2023, № 4, pp. 23-30  
 DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2023-4-23-30>

**Title**  
**PRESERVATION OF THE PILLAR AND THE GATE ROAD BY WEAKENING THE ROOF OF THE OVERLYING LONGWALL FACE WITH DIRECTIONAL HYDRAULIC FRACTURING**

**Authors**

Klshin V.I.<sup>1</sup>, Opruk G.Yu.<sup>1</sup>, Gogolin V.A.<sup>2</sup>, Svyazev S.I.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Coal of Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of SB RAS, Kemerovo, 650065, Russian Federation

<sup>2</sup> Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), Kemerovo, 650000, Russian Federation

**Authors Information**

**Klshin V.I.**, Doctor of Engineering Sciences, Professor, RAS Corresponding, Director, e-mail: [klshinvi@icc.kemsc.ru](mailto:klshinvi@icc.kemsc.ru)  
**Opruk G.Yu.**, PhD (Engineering), Head of Efficient Coal Deposits Development Laboratory, e-mail: [opruk@yandex.ru](mailto:opruk@yandex.ru)  
**Gogolin V.A.**, Doctor of Engineering Sciences, Professor  
**Svyazev S.I.**, Senior engineer

**Abstract**

The directional hydraulic fracturing method is addressed for a poorly caving roof as well as the means of its implementation from the gate roads of a coal mine. The finite element method was used to present the results of a numerical simulation of the stress-and-strain state of the rock mass during the stoping operations in the adjacent coal seams XVI and XVII for the conditions of the Lenin mine. The effects of the formation pressure on the pillar and the gate roads of the underlying adjacent coal seam were established when mining the overlying coal seam with the stoping face method. The need is shown to weaken the roof by directional hydraulic fracturing of the overlying seam to eliminate the stresses on the pillar and the gate road of the underlying seam. Technological flowcharts were developed and mining arrangements were made to cave the roof in the overlying face, which made it possible to reduce the stresses on the pillar of underlying seam XVII, to eliminate coal breakage in the pillar and to execute the stope development activities with the specified support pattern.

**Keywords**

Underground mining, Adjacent seams, Poorly caving roof, Directional hydraulic fracturing, Splitter, Seal, Numerical modeling, Finite element method, Technological flowchart, In-mine testing.

**References**

- Artemyev V.B., Korshunov G.I., Loginov A.K., Yutyaev E.P. & Shik V.M. Protection of the development workings with pillars in coal mines. St. Petersburg, Nauka Publ., 2009, 229 p. (In Russ.).
- Klshin V.I., Rashevsky V.V., Artemiev V.B., Kopylov K.N., Klshin S.V. & Opruk G.Yu. Poorly caving roofs: challenges and solutions for the modern longwall mining in coal mines. Moscow, Gornoe Delo Publ., Cimmerian Centre LLC, 2016, 480 p. (In Russ.).
- Klshin V.I., Zvorygin L.V., Lebedev A.V. & Savchenko A.V. Safety issues and new technologies in underground mining of coal deposits. Novosibirsk: Novosibirskiy Pisatel' Publ., 2011, 524 p. (In Russ.).
- Oganesyan S.A. Accident in the Taizhina Mine Branch of Yuzhkuzbassugol: chronology, causes, conclusions. *Ugol'*, 2004, (6), pp. 25-28. (In Russ.).
- Li T., Cai M.F. & Cai M. A review of mining-induced seismicity in China. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007; 44(8): 1149-1171.
- Dou L.-M., Lu C.-P., Mu Z.-L. & Gao M.-S. Prevention and forecasting of rock burst hazards in coal mines. *Mining Science and Technology (China)*, 2009; 19(5): 585-591.
- Jeffrey R.G., Chen Z., Mills K.W., Pegg S. Monitoring and Measuring Hydraulic Fracturing Growth During Preconditioning of a Roof Rock over a Coal Longwall Panel. In book: *Effective and Sustainable Hydraulic Fracturing*, 2013, pp. 893-914. DOI: 10.5772/45724.
- R.G. Jeffrey, Z.R. Chen, X. Zhang, A.P. Bungler, K.W. Mills Measurement and Analysis of Full-Scale Hydraulic Fracture Initiation and Reorientation. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, (48), pp. 2497-2512.

- Klshin V.I. Adaptation of powered support to dynamic stress conditions. Novosibirsk: Nauka Publ., 2002, 200 p. (In Russ.).
- Klshin V.I., Opruk G.Yu., Teleguz A.S., Nikolaev A.V., Machrakov S.I. & Pechenev I.A. Implementation of Directional Hydraulic Fracturing (DHF) in tackling geotechnological challenges of managing excessive rock pressure. *Ugol'*, 2021, (11), pp. 6-12. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2021-11-6-12.
- Klshin V.I., Opruk G.Yu., Salihov A.F. & Pyaterikin D.V. Weakening of hard-tobreak roof formations using directional hydraulic fracturing (DHF) when the mechanized complex leaves the set-up entry. *Ugol'*, 2020, (11), pp. 4-8. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2020-11-4-8.
- Drzewiecki J. Neue Verfahren zur Bekämpfung der Gebirgsschlaggefahr. *Gluckauf*, 2002, (2).
- Liu J., Liu C. & Li X. Determination of fracture location of double-sided directional fracturing pressure relief for hard roof of large upper goaf-side coal pillars. *Energy Exploration & Exploitation*, 2020, Vol. 38, (1), pp. 111-136.
- Huang B., Zhao X., Ma J. et al. Field experiment of destress hydraulic fracturing for controlling the large deformation of the dynamic pressure entry heading adjacent to the advancing longwall face. *Archives of Mining Sciences*, 2019, Vol. 64, (4), pp. 829-848.
- Hu He, Linming Dou, Jun Fan et al. Deephole directional fracturing of thick hard roof for rockburst prevention. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, (32), pp. 34-43.
- Zubov V.P. & Le Quang Phuc. Development of resource-saving technology for excavation of flat-lying coal seams with tight roof rocks (on the example of the Quang Ninh coal basin mines). *Zapiski Gornogo instituta*, 2022, (257), pp. 795-806. (In Russ.). DOI: 10.31897/PMI.2022.72.
- Shtumpf G.G., Ryzhkov Yu.A., Shalamanov V.A. & Petrov A.I. Physical and mechanical properties of rocks and coals of the Kuznetsk Basin. Reference Book. Moscow, Nedra Publ., 1994, 447 p. (In Russ.).
- Zenkevich O. The finite element method in engineering. Moscow, Mir Publ., 1975.
- Disintegration. Vol. 2, Moscow, Mir Publ., 1975. 764 p. (In Russ.).

**Acknowledgements**

The research was carried out as part of the 'Development and implementation of complex technologies in the areas of exploration and extraction of minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new deep conversion products from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to human life' Integrated Scientific and Technical Programme of the Full Innovation Cycle, approved by Order No. 1144-p of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022 (Agreement No. 075-15-2022-1191).

**For citation**

Klshin V.I., Opruk G.Yu., Gogolin V.A. & Svyazev S.I. Preservation of the pillar and the gate road by weakening the roof of the overlying longwall face with directional hydraulic fracturing. *Ugol'*, 2023, (4), pp. 23-30. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2023-4-23-30.

**Paper info**

Received February 20, 2023

Reviewed February 28, 2023

Accepted March 27, 2023