

ГЕОМЕХАНИКА

УДК [622.276.66:622.834]004.942

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТИРОВКИ ИНИЦИИРУЮЩИХ ЩЕЛЕЙ НАПРАВЛЕННОГО ГИДРОРАЗРЫВА НА ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОРОД КРОВЛИ В ОКРЕСТНОСТИ ОЧИСТНОГО ЗАБОЯ

В. И. Клишин¹, Л. Д. Павлова², В. Н. Фрянов², А. Б. Цветков²

¹Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН,
E-mail: kvi194917@mail.ru, Ленинградский проспект, 10, 650065, г. Кемерово, Россия

²Сибирский государственный индустриальный университет,
E-mail: ld_pavlova@mail.ru, ул. Кирова, 42, 654007, г. Новокузнецк, Россия

Выполнена постановка краевой задачи для моделирования напряженно-деформированного состояния геомассива с учетом нелинейного характера деформирования пород в зонах влияния подземных горных выработок. Рассмотрены различные варианты расположения скважин для направленного гидроразрыва пород труднообрушаемой кровли, позволяющие снизить риск опасных геодинамических явлений при отработке пологого угольного пласта длинными очистными забоями. Результаты численного моделирования показали, что наиболее эффективным вариантом является расположение инициирующей щели в кровле пласта параллельно природному напластованию горных пород в углепородном массиве. Установлено, что существенное влияние инициирующие щели оказывают на уменьшение смещений пород кровли над забоем вследствие разгрузки массива горных пород между искусственной трещиной и отрабатываемым угольным пластом. Этот эффект усиливается при увеличении длины инициирующей щели до 10–20 м.

Угольный пласт, подземные выработки, труднообрушаемая кровля, моделирование, напряжения, деформации, остаточная прочность, инициирующие щели гидроразрыва

DOI: 10.15372/FTPRPI20250101

EDN: QWWOJM

На современных угольных шахтах, где отработка пологих угольных пластов осуществляется длинными комплексно-механизированными забоями с суточной нагрузкой до 20 тыс. т, пространственные изменения горно-геологических условий ведения горных работ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 11.05.2022 г. № 1144-р (соглашение № 075-15-2022-1191).

в значительной степени влияют на горнотехническую ситуацию [1–3]. Вследствие периодического зависания и обрушения подработанных пород кровли изменяются параметры опорного горного давления в окрестности очистного забоя, форма и размеры вывалов пород кровли, отжима угля, пучения пород почвы и динамика выделения метана в горные выработки [4].

В таких горно-геологических и горнотехнических условиях для обеспечения безопасности горных работ, устойчивости проветривания выработок выемочного участка и запасных выходов из очистного забоя проводятся дополнительные вспомогательные выработки в виде сбоек, диагональных печей, скважин большого диаметра. При подходе очистного забоя к этим выработкам происходит наложение зон опорного горного давления в окрестности очистного забоя, что проявляется в виде обрушений пород кровли, интенсивного отжима угля на краевых участках пласта, пучения и разрушения пород почвы с прорывом по трещинам в очистной забой метана.

Проблемы выбора способов и средств обеспечения эксплуатационной устойчивости подземных выработок и снижения риска возникновения опасных производственных ситуаций связаны с отсутствием надежных методик прогноза параметров геомеханических процессов в окрестности системы вспомогательных выработок и приближающегося к ним очистного забоя.

В настоящей работе предлагается решение задачи обеспечения эксплуатационной устойчивости подземных выработок, в том числе очистного забоя, посредством управления кровлей с применением направленного гидроразрыва труднообрушаемой кровли для снижения риска возникновения опасных геодинамических явлений и внезапного разрушения пород в подземных выработках угольных шахт.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате техногенного воздействия горных работ на массив горных пород формируются зоны, в которых породы переходят из упругого в упругопластическое, предельное и запредельное состояния. Негативное влияние этих процессов следует принимать во внимание при математическом моделировании напряженно-деформированного состояния геомассива. Для решения данной задачи используется математическая модель, в которой учитывается нелинейный характер деформирования пород в зонах, подвергшихся влиянию техногенных сил [5, 6]. Рассматривается деформирование пород при направленном поинтервальном гидроразрыве труднообрушаемых пород кровли угольных пластов с разным расположением иницирующих щелей.

Задача решается в плоской постановке. Для прямоугольной области $\Omega = \{-0.5S \leq x \leq 0.5S; -h \leq y \leq H\}$ требуется найти функции $u(x, y)$, $w(x, y)$, удовлетворяющие системе дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} \mu^*(u''_{xx} + u''_{yy}) + (\lambda^* + \mu^*)(u''_{xx} + u''_{yy}) + F_x = 0, \\ \mu^*(u''_{xx} + u''_{yy}) + (\lambda^* + \mu^*)(u''_{xy} + u''_{yx}) + F_y = 0, \end{cases} \quad (1)$$

и граничным условиям: $u(-0.5S, y) = 0$, $u(0.5S, y) = 0$, $u(x, -h) = 0$, $w(x, -h) = 0$, $\sigma_y(x, H) = 0$, $\sigma_x(x, -h) = -\gamma(H+h)$, где S , $H+h$ — длина и высота прямоугольной расчетной области Ω (рис. 1); $\mu^* = E^* / (2(1+\nu^*))$, $\lambda^* = E^* \nu^* / ((1+\nu^*)(1-2\nu^*))$, $E^* = 3E / (2E\psi + 1 - 2\nu)$, $\nu^* = ((1/2 - (1 - 2\nu) / E \cdot 1 / (2\psi)) / (1 + (1 - 2\nu) / E \cdot 1 / (2\psi)))$ — переменные параметры; E — модуль упругости; ν — коэффициент Пуассона; ψ — функция, отражающая нелинейную связь между напряжениями и деформациями, (u, w) — компоненты вектора перемещений; σ_y — вертикальная компонента

тензора напряжений; $F^T = (F_x, F_y)$ — вектор массовых сил. Согласно основным положениям теории сдвижения горного массива [7], на рис. 1 показаны зоны деформирования массива горных пород в окрестности очистной выработки: 1 — зона опорного горного давления; 2 — зона прогиба и горизонтальных сдвигов; 3 — зона плавного оседания; 4 — зона разгрузки и пучения; 5 — зона трещин; 6 — зона обрушения. Углы сдвижения φ и δ , ширина зоны опорного горного давления l и высота зоны надработанных пород h определяются в соответствии с нормативными документами [8, 9].

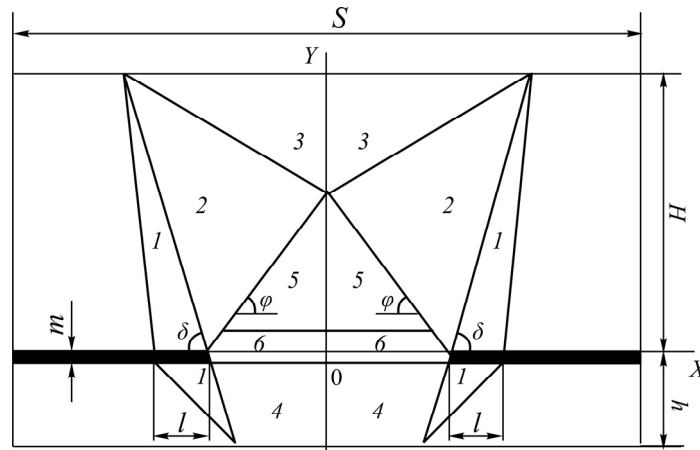


Рис. 1. Схема распределения зон деформирования массива горных пород в области влияния очистной выработки

Для формирования определяющих соотношений в зонах деформирования пород составлена функция Ψ , от которой зависят параметры E^* и ν^* системы дифференциальных уравнений (1). На участке упругого деформирования (зона 1 на рис. 1) функция $\psi = 1/2\mu$. На участках нелинейного деформирования (зоны 2–6 на рис. 1) функция ψ принимает вид $\psi = 3\varepsilon / (2\sigma(\varepsilon))$, где $\sigma(\varepsilon)$ — зависимость между интенсивностями касательных напряжений и деформаций сдвига.

Для аналитического задания диаграмм деформирования горных пород предлагается следующая зависимость $\sigma(\varepsilon)$:

$$\sigma(\varepsilon) = \begin{cases} E\varepsilon, & 0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{\text{упр}}; \\ \sigma_{\text{упр}} + (\sigma_{\text{пред}} - \sigma_{\text{упр}}) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{\text{упр}}}{\varepsilon_{\text{пред}} - \varepsilon_{\text{упр}}} \right)^n, & \varepsilon_{\text{упр}} \leq \varepsilon < \varepsilon_{\text{пред}}; \\ \sigma_{\text{пред}} + (\sigma_{\text{пред}} - \sigma_{\text{ост}}) \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_{\text{пред}}}{\varepsilon_{\text{ост}} - \varepsilon_{\text{пред}}} \right)^m, & \varepsilon_{\text{пред}} \leq \varepsilon < \varepsilon_{\text{ост}}; \\ \sigma_{\text{ост}}, & \varepsilon \geq \varepsilon_{\text{ост}}, \end{cases} \quad (2)$$

здесь $\sigma_{\text{упр}}$ — напряжения, соответствующие пределу упругости; $\varepsilon_{\text{упр}}$ — предельные упругие деформации; $\sigma_{\text{пред}}$ — предел прочности пород при сжатии; $\varepsilon_{\text{пред}}$ — предельные сжимающие деформации; $\sigma_{\text{ост}}$ — остаточные напряжения; $\varepsilon_{\text{ост}}$ — остаточные деформации; n, m — коэффициенты, значения которых зависят от типов горных пород ($n = 0.5, 1.5, 1.0, 2.0$; $m = 2.0, 1.5, 1.0, 0.5$ соответственно для песчаника, алевролита, аргиллита и угля).

Напряженно-деформированное состояние определялось с применением метода конечных элементов на основе разработанного комплекса проблемно-ориентированных программ [10, 11]. Начальное напряженное состояние в угольном пласте принято в соответствии с гипотезой А. Н. Динника [12]: $\sigma_y^0 = -\gamma H$; $\sigma_x^0 = -\gamma H / (1 - \nu)$, где σ_y^0 — вертикальные напряжения; σ_x^0 — горизонтальные напряжения; H — глубина залегания пласта; γ — объемный вес пород.

Параметром нагружения является вес пород, который изменяется в соответствии с весом подработанных пород кровли и распределяется в зоне опорного горного давления пропорционально величинам относительных деформаций в краевой части отработываемого пласта.

Геомеханическая модель массива горных пород принята сплошной, слоисто-неоднородной, анизотропной, включающей до 100 породных слоев. Для каждого слоя по результатам лабораторных исследований задаются показатели основных физико-механических свойств угля и пород Кузбасса (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Физико-механические свойства основных типов пород Кузбасса*

Порода	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}$, МПа	Объемный вес γ , кг/м ³	Коэффициент Пуассона	Предел прочности, МПа	
				при сжатии	при растяжении
Песчаник	2.8	2731	0.27	80.7	8.1
Алевролит	2.6	2580	0.30	54.9	5.5
Аргиллит	2.2	2490	0.39	32.0	2.8
Уголь	0.9	1330	0.42	11.0	0.3

*При отсутствии исходных данных в геологических отчетах физико-механические свойства пород принимаются по справочнику [13]

Для выбора оптимального расположения скважин и инициирующих щелей гидроразрыва осуществляется предварительная оценка. По каждому варианту устанавливается влияние трещины гидроразрыва на риски возникновения опасных производственных ситуаций: обрушений пород кровли, пучения пород почвы выработок, внезапных выделений метана, геодинамических явлений. По результатам анализа вариантов направленного гидроразрыва пород кровли обоснованы рекомендации для разработки в установленном порядке документации безопасного и эффективного ведения горных работ.

Построение расчетной модели проведено согласно горно-геологическим и горнотехническим условиям отработки угольных пластов с труднообрушаемыми кровлями на шахтах Кузбасса. В качестве примера построения расчетной модели принята технологическая схема отработки угольного пласта шахты “Березовская”. Технологическая схема реализуется в следующих горно-геологических условиях. Мощность пласта в выемочном столбе изменяется в пределах 0.77–1.18 м, в среднем равна 0.98 м. Пласт простого строения, предел прочности угля при сжатии 6 МПа. Глубина разработки пласта на сопряжении вентиляционного штрека и очистного забоя составляет 390 м.

Непосредственная кровля пласта среднеустойчивая, мощностью 2–6 м, представлена алевролитом темно-серым, от грубо- до мелкозернистого. В нижней части непосредственной кровли выявлены переслаивания алевролита и песчаника мощностью до 1 м. Предел прочности пород при сжатии 54.9 МПа. Основная кровля пласта мощностью 60–90 м включает светло-

серые песчаники от мелко- до крупнозернистого. Предел прочности пород при сжатии 70–118 МПа. В почве пласта залегают алевролит темно-серый, мощность слоев в почве 0,2–0,4 м. Предел прочности пород почвы при сжатии 46–55 МПа.

Общий вид фрагмента выемочной панели с очистным забоем и подготовительными выработками в плоскости пласта представлен на рис. 2. Ось OX направлена по линии простирания пласта параллельно штрекам, ось OY — по линии восстания пласта параллельно лаве № 49.

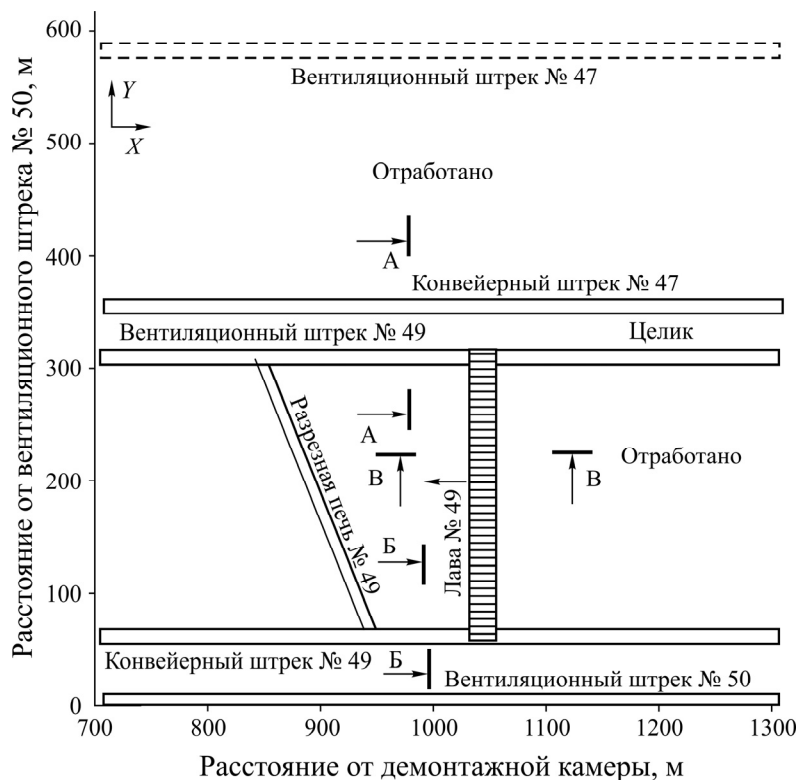


Рис. 2. Схема расположения выработок и разупрочнения пород кровли по рассматриваемым сечениям А–А, Б–Б и В–В

Угольный пласт отрабатывается системой разработки длинными столбами по простиранию с выемкой угля очистным комплексно-механизированным забоем. Впереди движущейся лавы через каждые 300–400 м проводятся диагональные выработки. Верхний выемочный столб полностью отработан, нижний столб находится в стадии отработки. Для снижения негативного влияния труднообрушаемой кровли предлагается применение направленного гидроразрыва (НГР) [14–21].

В соответствии с постановкой двумерной задачи исследования характера деформирования пород труднообрушаемой кровли в окрестности очистного забоя рассматриваются вертикальные сечения вдоль оси выемочного столба В–В на рис. 2. Направление скважины гидроразрыва совпадает с плоскостью вертикального сечения.

Ширина инициирующей щели устанавливается по результатам видеосъемки при пересечении щели гидроразрыва шпуром. Как правило, ширина щели гидроразрыва находится в диапазоне 0–20 мм, поэтому при решении упругой задачи данный параметр принят равным 20 мм. На берегах трещины напряжения, перпендикулярные ее плоскости, принимаются равными нулю. По результатам поэтапного решения задачи вычисляется конвергенция берегов щели. При смыкании берегов трещины в ее окрестности по всей длине формируются зоны запредель-

ного состояния и разрушения пород. В боках трещины гидроразрыва также возникает локальный свод по аналогии с закономерностями формирования свода разрушенных пород в окрестности подземных выработок.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведение вычислительных экспериментов методом конечных элементов позволяет выполнить оценку эксплуатационной устойчивости подземных выработок по коэффициенту концентрации вертикальных напряжений, смещениям и остаточной прочности угля и пород при разгрузке массива горных пород способом направленного гидроразрыва.

С помощью численного моделирования получено распределение значений коэффициента концентрации вертикальных напряжений K_σ , который определяется как отношение текущего значения вертикальных напряжений к весу пород на данной глубине (рис. 3). Установлено, что при длине выработанного пространства 105 м в зоне полных сдвижений подработанных пород происходит их разгрузка. Высота свода зоны полных сдвижений ожидается в пределах 20 м.

Максимальное значение коэффициента концентрации вертикальных напряжений в угольном пласте на краевой части пласта в лаве $K_\sigma = 2.4$. При глубине разработки $H = 390$ м вертикальные напряжения в пласте составили 20–23 МПа, что в 2 раза больше предела прочности угля при сжатии. В этом случае возможно разрушение угля в очистном забое и повышение риска возникновения опасных производственных ситуаций.

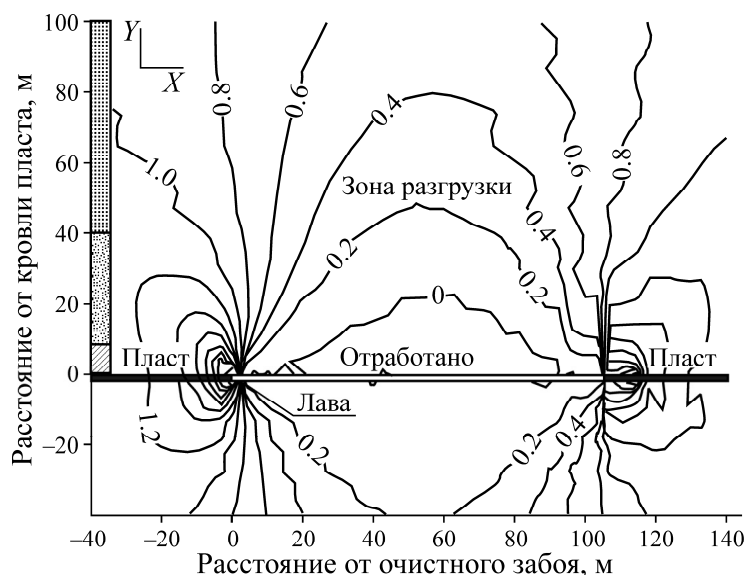


Рис. 3. Распределение значений коэффициента концентрации вертикальных напряжений в вертикальном сечении вдоль выемочного столба

В соответствии с полученными результатами распределения геомеханических параметров в массиве горных пород в окрестности очистного забоя и согласно рекомендациям [8, 9] изучено влияние параметров и пространственного положения щелей гидроразрыва для следующих вариантов: горизонтальная щель I—I в кровле пласта, щель II—II с наклоном в сторону очистного выработанного пространства, щель III—III с наклоном в сторону очистного забоя (рис. 4).

Представлены изменения вертикальных смещений горных пород до и после формирования разгрузочных щелей. В каждом варианте расположения щелей гидроразрыва по результатам численного моделирования проводился анализ распределения вертикальных смещений пород

кровли, коэффициента концентрации вертикальных напряжений, отношения остаточной прочности угля и пород к исходной. Для оценки влияния щелей гидроразрыва на состояние массива горных пород в окрестности очистного забоя выделены контрольные точки 1–6, в которых определялись указанные геомеханические параметры. В качестве исходных данных приняты результаты расчетов параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород до проведения инициирующих щелей гидроразрыва.

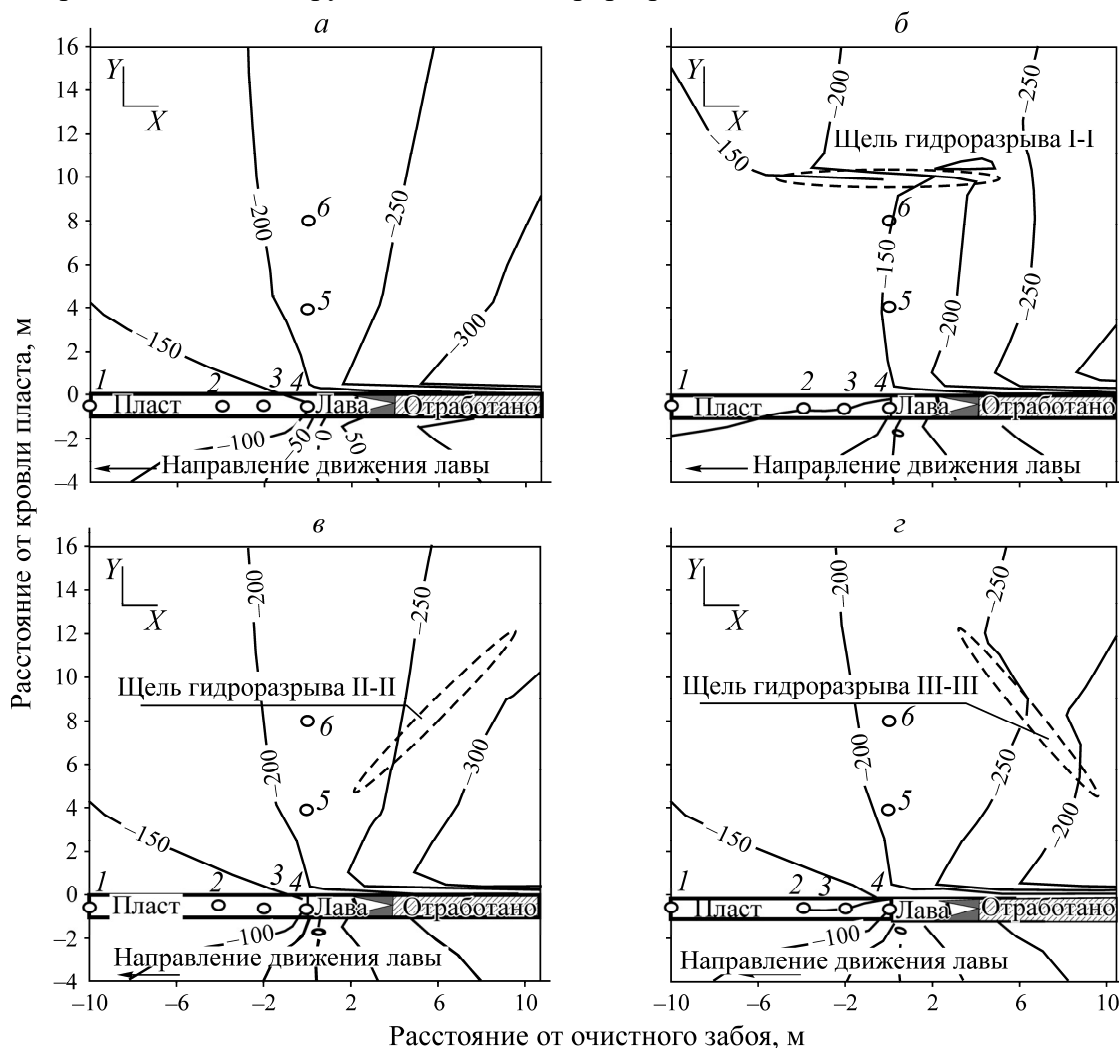


Рис. 4. Распределение вертикальных смещений массива горных пород в окрестности очистного забоя, мм: а — до формирования инициирующих щелей; б — после формирования щели I–I параллельно напластованию породных слоев; в — после формирования наклонной щели II–II; г — после формирования наклонной щели III–III; 1–6 — контрольные точки

Согласно графикам, существенное уменьшение вертикальных смещений пород кровли (точка 4 в лаве) наблюдается после формирования горизонтальной щели I–I (рис. 4б) — в 1.3 раза по сравнению с оседаниями пород кровли до формирования щели. Наклонные щели гидроразрыва II–II и III–III обеспечивают уменьшение вертикальных смещений лишь в 1.05–1.10 раза. Влияние щелей гидроразрыва на состояние угольного массива впереди забоя не выявлено. В почве пласта вблизи очистного забоя во всех вариантах получены вертикальные смещения в виде пучения пород до 100 мм.

На рис. 5 представлены графики распределения коэффициента концентрации вертикальных напряжений в массиве горных пород до и после формирования инициирующих трещин гидроразрыва. Установлено, что в окрестности щелей гидроразрыва происходит существенное перераспределение вертикальных напряжений, но вблизи очистного забоя характер распределения и значения напряжений практически не изменились. Следует отметить, что на краях щелей формируется локальная зона повышенных напряжений по аналогии с теорией опорного горного давления в окрестности подземных выработок.

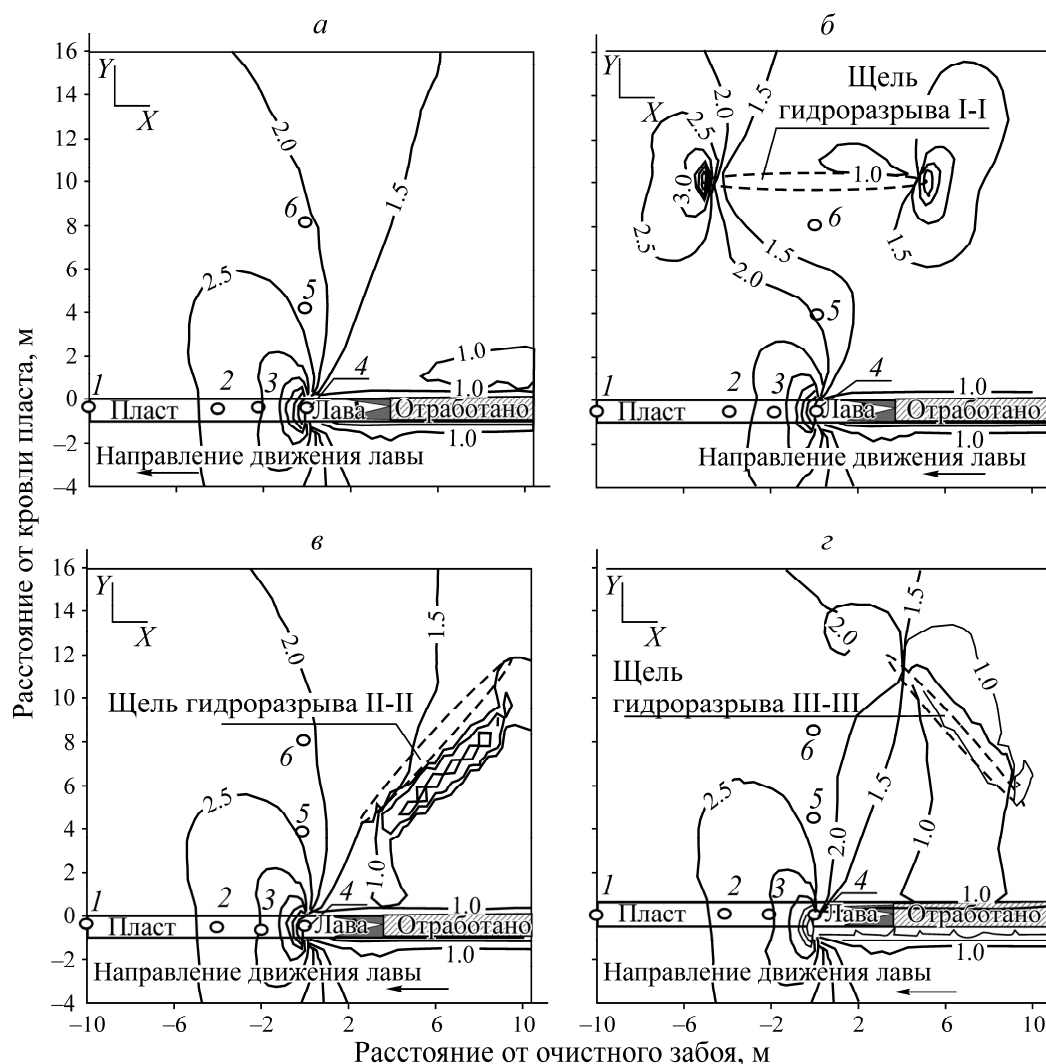


Рис. 5. Распределение коэффициента концентрации вертикальных напряжений в окрестности очистного забоя: *a* — до формирования инициирующих щелей; *б* — после формирования щели I–I параллельно напластованию породных слоев; *в* — после формирования наклонной щели II–II; *г* — после формирования наклонной щели III–III; 1–6 — контрольные точки

Влияние щелей гидроразрыва наиболее выпукло иллюстрирует распределение отношения остаточной прочности угля и пород к исходной (рис. 6). Почти во всех случаях расположения щелей произошло уменьшение прочности пород непосредственной и частично основной кровли. Ширина щелей на рис. 5, 6 показана с учетом разрушения пород на берегах трещины.

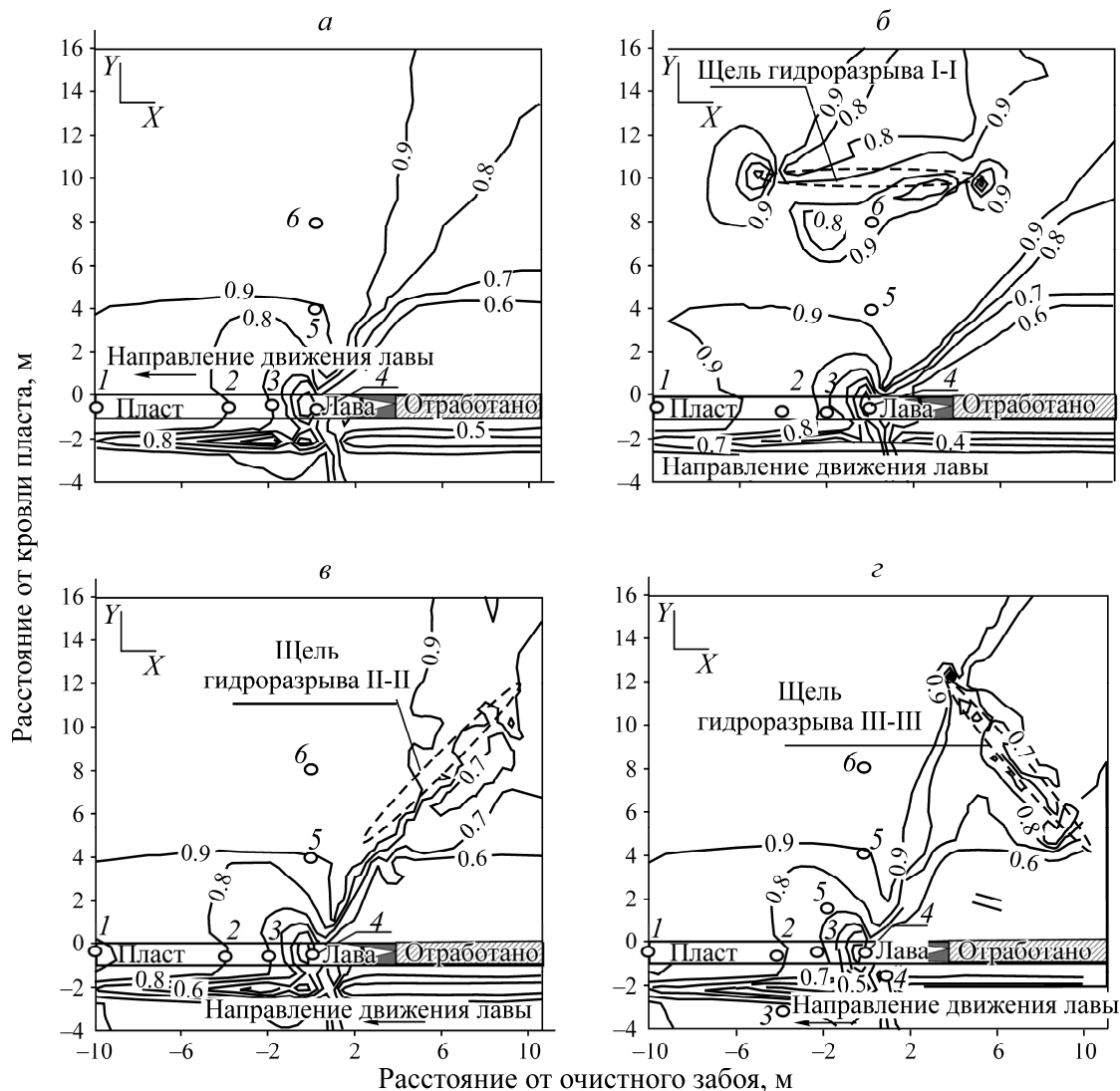


Рис. 6. Распределение отношения остаточной прочности угля и пород к исходной прочности в окрестности очистного забоя: а — до формирования инициирующих щелей; б — после формирования щели I–I параллельно напластованию породных слоев; в — после формирования наклонной щели II–II; г — после формирования наклонной щели III–III; 1–6 — контрольные точки

Над секциями механизированной крепи высока вероятность образования куполов и вывалов пород кровли. Во всех вариантах, в том числе и до формирования щелей гидроразрыва, в лаве отчетливо фиксируется разрушение пород почвы.

Результаты расчетов геомеханических параметров в контрольных точках приведены в табл. 2. Установлено, что влияние инициирующих щелей длиной 10 м недостаточно для изменения геомеханической ситуации в окрестности очистного забоя. Так как наиболее существенное влияние оказывает параллельная напластованию пород щель I–I, то расчет проводился с длиной этой щели 20 м.

На рис. 7 представлены изолинии вертикальных смещений массива горных пород после формирования инициирующей щели длиной 20 м, параллельной напластованию.

ТАБЛИЦА 2. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности очистного забоя

Номера контрольных точек с координатами, м	Варианты моделирования*	Коэффициент концентрации вертикальных напряжений	Отношение остаточной прочности к исходной	Касательные напряжения, МПа	Вертикальные смещения пород, мм
1 $x = -10, y = -0.5$	<i>a</i>	1.67	0.91	-0.72	-129
	<i>б</i>	1.67	0.94	-0.54	-107
	<i>в</i>	1.58	0.94	-0.32	-98
2 $x = -4, y = -0.5$	<i>a</i>	1.77	0.80	-0.84	-135
	<i>б</i>	1.67	0.86	-0.82	-102
	<i>в</i>	1.57	0.89	-0.37	-79
3 $x = -2, y = -0.5$	<i>a</i>	1.79	0.71	-1.15	-139
	<i>б</i>	1.71	0.78	-1.38	-103
	<i>в</i>	1.61	0.84	-0.99	-75
4 $x = -0.2, y = -0.5$	<i>a</i>	1.86	0.40	-0.25	-130
	<i>б</i>	1.85	0.33	-0.29	-94
	<i>в</i>	1.60	0.40	-0.29	-71
5 $x = 0.0, y = 4.0$	<i>a</i>	1.46	0.87	-2.06	-213
	<i>б</i>	1.39	0.91	-2.10	-151
	<i>в</i>	1.29	0.97	-0.86	-95
6 $x = 0.0, y = 8.0$	<i>a</i>	1.45	0.97	-1.87	-215
	<i>б</i>	1.06	0.80	-1.49	-147
	<i>в</i>	1.02	0.85	-0.38	-91

*до формирования щелей (*a*); после формирования щели I–I длиной 10 м (*б*) и 20 м (*в*) по напластованию на расстоянии 10 м от пласта

Сравнение смещений пород на рис. 4 и 7 (точки 5 и 6) подтверждает существенную разгрузку пород кровли над очистным забоем и уменьшение смещений почти на 30 % после формирования щели длиной 20 м. Образование щели длиной 20 м над очистным забоем производит эффект, подобный его надработке. Положительный эффект разгрузки нижнего пласта при его надработке подтверждается инструкцией [22].



Рис. 7. Оседания пород (мм) в окрестности очистного забоя после формирования инициирующей щели длиной 20 м в кровле пласта

На рис. 8 (а, б) представлены графики распределения значений коэффициентов концентрации вертикальных напряжений и максимальных касательных напряжений. Согласно графикам, формирование инициирующих щелей гидроразрыва не приводит к изменению общего характера распределения напряжений, однако с увеличением длины разгрузочной щели происходит уменьшение напряжений в краевой части угольного пласта в лаве на 15–40 %.

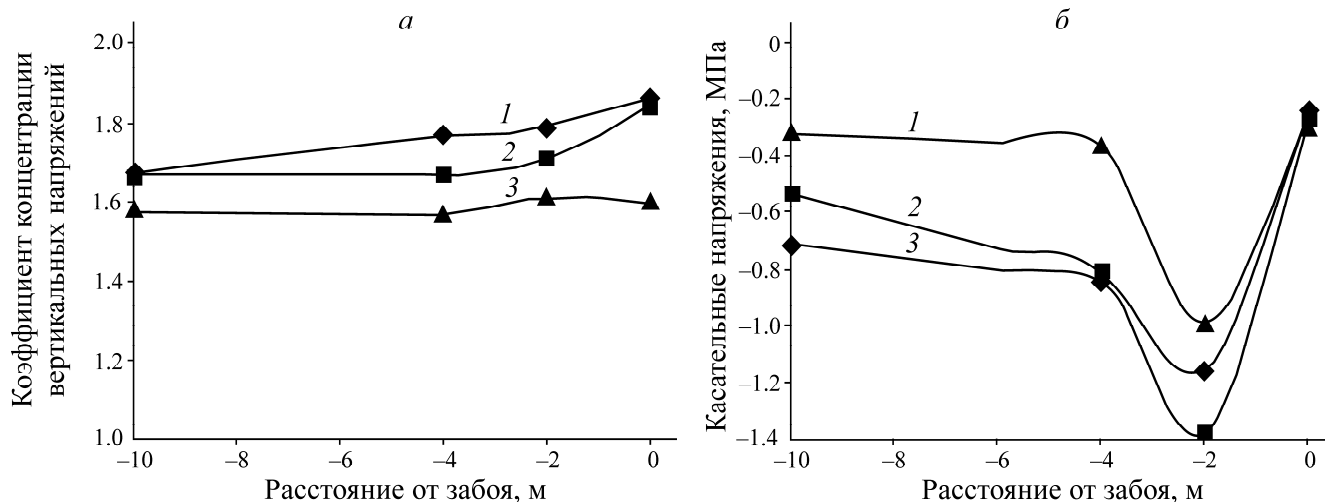


Рис. 8. Изменение значений коэффициента концентрации вертикальных напряжений (а) и касательных напряжений (б) в обрабатываемом пласте: 1 — до создания щели; 2 — щель I–I длиной 10 м; 3 — щель I–I длиной 20 м

Наиболее существенное влияние разгрузочные щели оказывают на вертикальные смещения пород кровли угольного пласта (рис. 9а). Установлено влияние щелей гидроразрыва на оседания пород кровли пласта: с увеличением длины щели до 20 м оседания пород кровли снижаются почти в 2 раза по сравнению с подобными оседаниями до формирования щели. При этом формирование щели в пределах 10–20 м не приводит к заметному изменению характера распределения отношения остаточной прочности угля к исходной (рис. 9б).

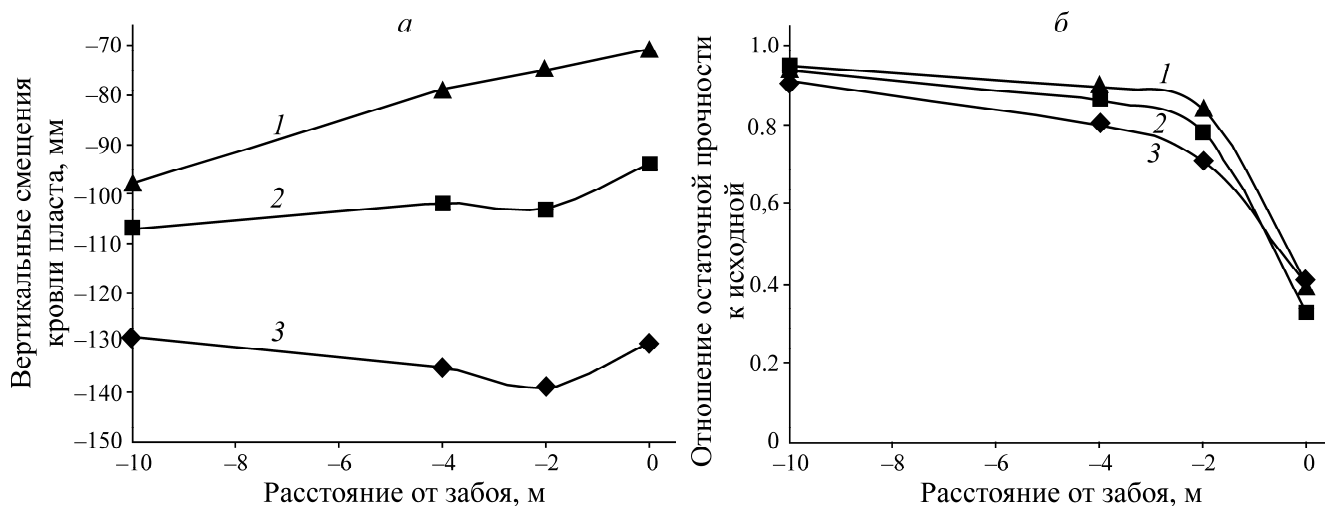


Рис. 9. Изменение вертикальных смещений пород кровли (а) и отношения остаточной прочности угля к исходной (б) в обрабатываемом пласте: 1 — до создания щели; 2 — щель I–I длиной 10 м; 3 — щель I–I длиной 20 м

Выполненные расчеты позволили приступить к опытно-промышленным испытаниям технологии разупрочнения пород кровли методом направленного гидроразрыва для принудительной посадки кровли пласта XXVI на сопряжении лавы № 49 с вентиляционным штреком № 49 и разрезной печью в условиях шахты “Березовская” АО “Угольная компания “Северный Кузбасс”.

С учетом взаимного влияния системы угольных целиков, очистных и подготовительных выработок разупрочнение пород основной кровли пласта XXVI осуществлялось методом НГР через вертикальные и наклонные скважины диаметром 46–48 мм, длиной 8.5 м и 9.8 м. Бурение скважин проводилось с интервалом 15 м под углом 60° и 90° к горизонту, а также с разворотом на очистной забой таким образом, чтобы угол между осью выработки и проекцией скважины НГР на горизонтальную плоскость был равен 90° (рис. 10).

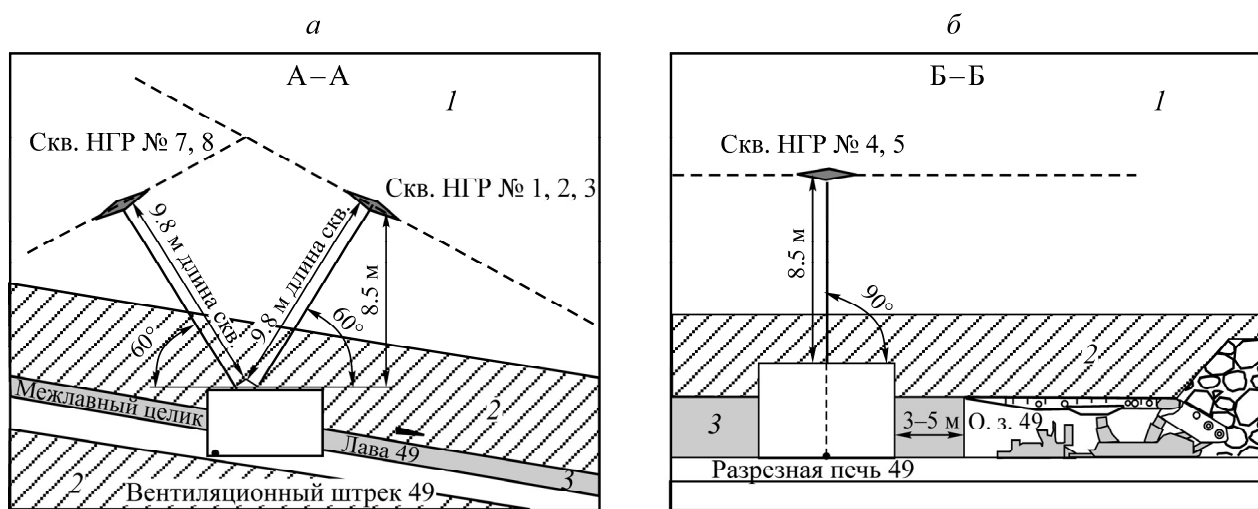


Рис. 10. Схема расположения шпуров для реализации метода НГР из вентиляционного штрека № 49, вид А–А (а) и из разрезной печи № 49, вид Б–Б (б): 1 — песчаник устойчивый, склонен к завесанию; 2 — алевролит среднеустойчивый; 3 — уголь пласта XXVI

Разупрочнение пород кровли методом НГР позволило избежать роста напряжений в зоне опорного давления в краевых частях угля и целиках, прилегающих к выработке, а также разгрузки и разрушения пород почвы.

ВЫВОДЫ

Предложен способ изменения параметров геомеханических процессов в массиве горных пород, основанный на результатах моделирования пространственного расположения инициирующих щелей гидроразрыва с оценкой рационального варианта по величинам вертикальных напряжений, оседаний пород кровли и пучения пород почвы.

Наибольшее влияние на геомеханическую ситуацию впереди лавы отрабатываемого угольного пласта оказывает параллельная напластованию пород щель гидроразрыва в кровле пласта. Установлено недостаточное влияние таких щелей длиной 10 м на изменение геомеханической ситуации в окрестности очистного забоя. При увеличении их длины до 20 м происходит разгрузка горного массива между щелью и кровлей очистного забоя и снижение вертикальных смещений пород кровли на 30–50 %.

Результаты численного моделирования успешно апробированы при отработке пласта XXVI шахты “Березовская” АО “Угольная компания “Северный Кузбасс”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чернов О. И. Гидродинамическая стратификация монолитных пород в качестве способа управления труднообрушаемой кровли // ФТПРПИ. — 1982. — № 2. — С. 18–22.
2. Клишин В. И., Зворыгин Л. В., Лебедев А. В., Савченко А. В. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. — Новосибирск: Новосибирский писатель, 2011. — 524 с.
3. Коровкин Ю. А., Савченко П. Ф. Теория и практика длиннолавных систем. — М.: Горн. дело, Киммерийский центр, 2012. — 808 с.
4. Клишин В. И., Опрук Г. Ю., Павлова Л. Д., Фрянов В. Н. Обоснование активных способов предразрушения подкровельной толщи при отработке мощных пологих пластов с выпуском угля // ФТПРПИ. — 2020. — № 3. — С. 75–84.
5. Безухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. — М.: Высш. шк., 1968. — 512 с.
6. Писаренко Г. С., Можаровский Н. С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. — Киев: Наукова думка, 1981. — 496 с.
7. Сдвижение горных пород и земной поверхности в главнейших угольных бассейнах СССР. — М.: Углетехиздат, 1958. — 250 с.
8. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных работ на угольных месторождениях. — СПб.: ВНИМИ, 1998. — 291 с.
9. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности “Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений”. — М.: Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности, 2020. — 148 с.
10. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности / пер. с англ. В. В. Кобелева, А. П. Сейраняна ; под ред. Н. В. Баничука. — М.: Мир, 1987. — 542 с.
11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020618595. Программный комплекс для моделирования геомеханических процессов в структурно неоднородном геомассиве при взаимном влиянии системы подземных горных выработок / В. Н. Фрянов, Л. Д. Павлова, А. Б. Цветков; ФГБОУ ВО Сиб. гос. индустр. ун-т // Фед. служба по интеллект. собств. — Дата регистр. 30 июля 2020.
12. Динник А. Н., Моргаевский А. Б., Савин Г. Н. Распределение напряжений вокруг подземных горных выработок / Тр. совещания по управлению горным давлением. — Л., М.: Академиздат СССР. Отделение технических наук, 1938. — С. 7–55.
13. Штумпф Г. Г., Рыжков Ю. А., Шаламанов В. А., Петров А. И. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна. — М.: Недра, 1994. — 447 с.
14. Патутин А. В., Сердюков Л. А., Рыбалкин А. Н., Дробчик С. В. Результаты физического моделирования гидроразрыва пересекающихся скважин в неоднородном поле напряжений // ФТПРПИ. — 2024. — № 1. — С. 50–57.
15. Zhao W., Cheng Y., and Guo P. An analysis of the gas–solid plug flow formation: new insights into the coal failure process during coal and gas outbursts, Powder Technol., 2017, Vol. 305. — P. 39–47.
16. Sadavarte P., Pandey S., Maasackers J. D., Lorente A., Borsdorff T., Hugo Denier van der Gon, Houweling S., and Aben I. Methane emissions from superemitting coal mines in australia quantified using TROPOMI satellite observations, Env. Sci. Technol., 2021.
17. Özgen Karacan C. and Ricardo A. Olea. Stochastic reservoir simulation for the modeling of uncertainty in coal seam degas-ification, Fuel, 2015, Vol. 148. — P. 87–97.

18. **Huang Ruifeng.** Prevention of CO in a working face with Z-type ventilation using the N00 longwall mining method: a case study, Min., Metall. Explor., 2023, No. 40. — P. 463–474.
19. **Fan C. J., Li S., and Luo M. K.** Coal and gas outburst dynamic system, Int. J. Min. Sci. Technol., 2017, No. 1. — P. 49–55.
20. **Black D. J.** Review of coal and gas outburst in Australian underground coal mines, Int. J. Min. Sci. Technol., 2019, Vol. 29, Issue 6. — P. 815–824.
21. **Weiyong Lu, Wang Yonglong, and Zhang Xin.** Numerical simulation on the basic rules of multihole linear codirectional hydraulic fracturing, Hindawi geofluids-volume, 2020, Article ID 6497368.
22. **Инструкции** по выбору способа и параметров разупрочнения кровли на выемочных участках. Утв. Мин. угольной пром-сти СССР 02.04.1990. — Л.: ВНИМИ, 1991 — 21 с.

Поступила в редакцию 10/VII 2024

После доработки 15/I 2025

Принята к публикации 23/I 2025