DOI: 10.25558/VOSTNII.2026.71.90.002
УДК 622.023.23
© Н. В. Черданцев, А. Е. Майоров, 2026

Н. В. ЧЕРДАНЦЕВ
д-р техн. наук,
главный научный сотрудник
Институт угля ФИЦ УХХ СО РАН, г. Кемерово
e–mail: nvch2014@yandex.ru

А. Е. МАЙОРОВ
д-р техн. наук, проф. РАН,
и.о. директора Института угля
ФИЦ УУХ СО РАН, г. Кемерово
e–mail: majorov-ae@mail.ru

О СОСТОЯНИИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ВОКРУГ СКВАЖИНЫ, ПРОБУРЕННОЙ В БОРТУ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ

Особенность данной задачи заключается в оценке устойчивости и разрушения пласта вокруг скважины, пробуренной в краевой предельно напряжённой зоне пласта, расположенной в борту подготовительной выработки.

Задача формулируется и решается в два этапа. На первом этапе в рамках упругопластической плоской задачи строится поле напряжений в предельно напряжённой краевой зоне пласта около протяжённой пластовой выработки. Напряжения в этой зоне определяются методами В. В. Соколовского для сыпучей среды, а условия перехода в предельное состояние формулируются на основе общего и специального критериев Кулона — Мора. На втором этапе компоненты найденного поля напряжений, действующих на контакте пласта с вмещающим массивом, принимаются в качестве исходного поля напряжений для трёхмерной пластичной среды, в которой расположен вырез цилиндрической формы. На этом этапе напряжения около скважины определяются из решения методом граничных интегральных уравнений второй внешней краевой задачи теории упругости с заменой упругих постоянных аналогичными характеристиками для пластичного материала. Критерием разрушения угля является превышение максимальной деформации, соответствующей разрушению угольного образца при одноосном сжатии.

Ключевые слова: УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ГОРНАЯ ВЫРАБОТКА, СКВАЖИНА, ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЧНОСТИ, ПРЕДЕЛЬНО НАПРЯЖЁННЫЕ ЗОНЫ, МЕТОД ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ.

При отработке высокогазоносных угольных пластов возникает ряд газодинамических явлений, к которым относятся значительные выделения метана в выработанное пространство, а также внезапные выбросы угля и газа [1–9]. С увеличением глубины разработки месторождения риск возникновения газодинамических явлений существенно возрастает. Эти явления снижают безопасность ведения горных работ и уменьшают производительность горных работ.

В этой связи ещё на стадии подготовки к отработке газоносных угольных пластов предусмотрен комплекс мероприятий по

снижению в них содержания метана, называемых дегазацией [5–9].

Одним из эффективных способов борьбы с этими пагубными явлениями является метод дегазации посредством дегазационных скважин, пробуриваемых из подготовительных выработок вдоль выемочного столба до начала ведения очистных работ [6, 8, 9]. Основной задачей использования этого метода является расчёт геомеханического состояния окружающего скважину угольного пласта.

Целью данной статьи является решение задачи о распределении напряжений в предельно напряжённой зоне угольного пласта около дегазационной скважины и оценка её устойчивости при заданных параметрах скважины (длины и диаметра).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ЕЁ РЕШЕНИЕ

Расчётная схема задачи показана на рис. 1. Протяжённая выработка *1* с шириной поперечного сечения *b* пройдена по угольному пласту *2* на полную мощность *h*. Длина (протяжённость) выработки значительно превышает размеры поперечного сечения. В краевых частях пласта образуются предельно напряжённые зоны *3* шириной *L*, а в борту выработки после её проведения бурится дегазационная скважина *4* длиной l_s.

Решение задачи о состоянии дегазационной скважины предлагается решать в два этапа.

На первом этапе решается упругопластическая задача о напряжённом состоянии массива в окрестности протяжённой выработки, а компоненты построенного поля напряжений на этом этапе используются при решении задачи второго этапа.

На этом этапе система координат *yOz* совпадает с центральными осями поперечного сечения выработки, а ось *x* направлена вдоль трассы выработки. Поскольку длина выработки (размер вдоль оси *x*) намного превышает её ширину и высоту, то массив, в том числе и угольный пласт, в окрестности выработки находится в условиях плоской деформации и поэтому вдоль оси *x* деформация ε_x равна нулю. В этой связи задача о состоянии угольного пласта около выработки может быть решена как плоская задача механики деформируемого твёрдого тела. В такой постановке она формулируется следующим образом: плоскость, в которой имеется угольный пласт и прямоугольный вырез, нагружена сверху, снизу и с боков равнокомпонентным гравитационным давлением γH (γ — средневзвешенный объёмный вес налегающих пород).

В расчётах используются следующие характеристики пласта: σ_0 — предел прочности на одноосное сжатие, *K* — коэффициент сцепления, ρ — угол внутреннего трения. Характеристики прочности пород по контактам пласта с остальным массивом: K' — коэффициент сцепления, ρ' — угол внутреннего трения.

Предельно напряжённые зоны в пласте появляются на его кромках (в бортах выработки) при соблюдении условия [3]

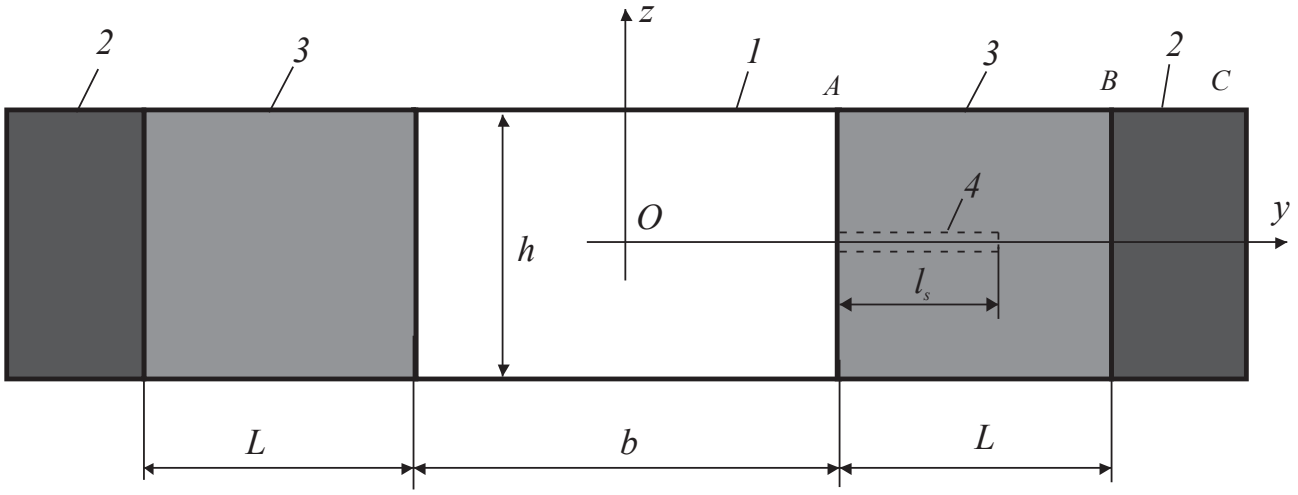

Рис. 1. Расчётная схема задачи с пластовой выработки

$$H \geq \frac{\sigma_0}{2\gamma}.$$

Поле напряжений в предельно напряжённой краевой зоне пласта в плоской задаче может быть построено методом характеристик, разработанным В. В. Соколовским [10]. В этом методе используются общий критерий Кулона — Мора прочности по основной породе и специальный критерий по контактам пласта с основным массивом (по поверхностям ослабления) и дифференциальные уравнения равновесия. Применение этого метода к решению ряда задач о напряжённом состоянии углепородного массива, вмещающего угольный пласт и пройденные по нему выработки, достаточно подробно показано в ряде работ [11–14].

Построенное поле напряжений в краевой зоне пласта можно использовать при решении второго этапа задачи, непосредственно касающегося состояния пласта вокруг скважины длиной l_s и диаметром d_0. После построения поля напряжений можно приступать ко второму этапу решения задачи уже непосредственно о распределении напряжений около скважины.

Как показывают результаты исследований [11–14], эпюры нормальных напряжений в предельно напряжённой зоне от борта вглубь пласта меняются существенно, поэтому, несмотря на то что длина скважины значительно превышает её диаметр, угольный пласт около скважины находится в объёмном напряжённом состоянии. Следовательно, для его оценки задачу необходимо решать в трёхмерной постановке, и на этом этапе она формулируется следующим образом. В пластической среде, представленной предельно напряжённой зоной пласта, чьи размеры значительно превышают размеры скважины, имеется вырез цилиндрической формы (рис. 2).

Среда нагружена давлением, обусловленным напряжениями σ_{y0}, σ_{z0}, τ_{yz0}, действующими в окрестности предполагаемого направления бурения скважины. Они берутся из результатов решения первого этапа задачи. Остальные напряжения на границе

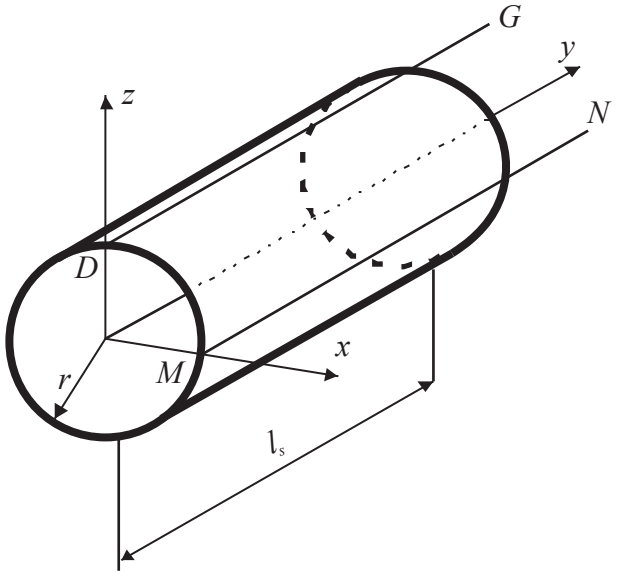

Рис. 2. Расчётная схема задачи с цилиндрическим вырезом

среды принимают следующие значения: $\tau_{xz0}=0$, $\sigma_{y0}=\lambda\sigma_{z0}$, $\tau_{xy0}=\lambda\tau_{yz0}$, где λ — коэффициент бокового давления в предельной напряжённой (сыпучей) среде определяется по формуле [10, 15]

$$\lambda=\frac{1-\sin\rho}{1+\sin\rho}.$$

Для построения поля напряжений в пластической среде с вырезом следует воспользоваться допущением Ильюшина о том, что задачу теории пластичности можно решать как задачу теории упругости, если в ней вместо упругих характеристик положить характеристики для пластичной среды [16].

Задача о распределении напряжений около цилиндрического выреза, как и задача о пластовой выработке в углепородном массиве, относится ко второй внешней краевой задаче теории упругости, она представляется граничным интегральным уравнением в форме интегрального уравнения Фредгольма второго рода [17] и решается методом механических квадратур [18]. В этом уравнении присутствует только одна упругая характеристика — коэффициент Пуассона μ, поэтому, приняв это значение равным 0,5 как для идеально пластичной среды, задачу второго этапа о распределении напряжений около цилиндрического выреза в предельно напряжённой

зоне можно решать как задачу теории упругости.

Следует отметить, что поле напряжений в предельно напряжённой зоне пласта построено независимо от полей деформаций и перемещений. В этой связи для полной оценки геомеханического состояния угольного пласта, в том числе и его прочности и устойчивости, необходимо знать распределение деформаций в предельно напряжённой зоне.

Так как поле напряжений в предельно напряжённой зоне пласта построено на основе критерия Кулона — Мора, то это предполагает, что его деформирование происходит при постоянной интенсивности напряжений σ_u, равной пределу прочности σ_0 пласта, и, следовательно, соответствует идеализированной диаграмме Прандтля [16, 19]. Согласно этой диаграмме, материал деформируется без упрочнения, т.е. при достижении интенсивностью напряжений предела прочности деформации в нём продолжают расти при том же уровне интенсивности напряжений. Такой рост деформаций материала называется течением, а горизонтальный участок площадки текучести на диаграмме условных напряжений неограничен, и поэтому оценить разрушения материала невозможно.

Однако реальные материалы имеют ограничения в деформациях, при достижении которых происходит либо их мгновенное разрушение, либо разупрочнение, которое на диаграмме условных напряжений соответствует участку снижения предела прочности до величины остаточной прочности [15, 20, 21]. В этой связи в расчётах диаграмму Прандтля можно использовать с ограниченным участком текучести, размер которого определяется исходя из результатов экспериментов с образцами на одноосное сжатие, а для оценки деформированного состояния пластической не упрочняющейся среды следует использовать зависимости ассоциированного закона пластического течения [15, 16, 19].

Ассоциированный закон пластического течения был применён в работе [14] для определения деформаций в краевой зоне пласта, а для оценки прочности пласта использовался деформационным критерием прочности. Согласно этому критерию, разрушение пласта в произвольной точке наступает при превышении значения интенсивности пластических деформаций ε_u значения интенсивности в образце при одноосном сжатии ε_{uO}, соответствующей его разрушению [15, 20, 21].

Интенсивность деформаций в конечных величинах деформациях при одноосном сжатии может быть определена из формулы [14]

$$\varepsilon_{u.O} = \frac{2}{3}\left(1 + \frac{1+\sin\rho}{1-\sin\rho}\right)\varepsilon_{np}. \qquad (1)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ И ИХ АНАЛИЗ

Ниже представлены результаты моделирования напряжённого состояния около дегазационной скважины.

Исследования проведены при следующих исходных данных: γ = 25 кН/м^3, H = 650 м, b = 5 м, h = 3 м, d_0 = 0,05 м, E = 6500 МПа, μ = 0,25; σ_0 = 10 МПа (K = 3,5 МПа), ρ = *20°*, K' = 0, ρ' = *10°*, ε_{np} = 0,018, l_s = 1 м.

На рис. 3, 4 показаны результаты решения первого этапа задачи о состоянии пласта около скважины: упругопластической задачи о напряжённом состоянии углепородного массива около пластовой выработки, представленные эпюрами напряжений.

На рис. 3 напряжения построены вдоль кровли пласта (вдоль линии *ABC* на рис. 1). Линиями *1, 3, 5* обозначены эпюры в предельно напряжённой зоне пласта, а линиями *2, 4, 6* — в его упругой области. Линии *1*, *2* — эпюра напряжений σ_z, *3*, *4* эпюра напряжений σ_y, *5*, *6* — эпюра касательных напряжений τ_{yz}. Максимальное значение вертикального напряжения σ_z действует на границе предельной зоны пласта и его упругой области массива (точка *B* на рис. 1) равно 25,781 МПа, а ширина предельно напряжённой зоны *L* составляет 4,27 м.

На рис. 4 эпюры нормальных напряжений построены вдоль оси пласта. Линиями *1, 3* обозначены эпюры в предельно напряжённой зоне пласта, а линиями *2, 4* — в его упругой области.

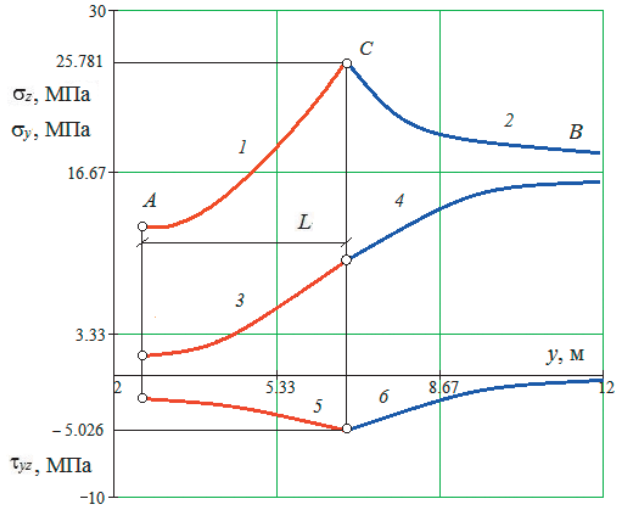

Рис. 3. Эпюры нормальных напряжений σ_z (кривые *1*, *2*), σ_y (кривые *3*, *4*) и касательного напряжения τ_{yz} (кривые *5*, *6*) вдоль кровли пласта (линии *ACB*)

Из рис. 4 следует, что максимальное нормальное напряжение σ_z на границе предельной зоны и упругой области пласта составляет 24,777 МПа. Поскольку ось y является осью симметрии, то касательные напряжения на ней отсутствуют, а нормальные напряжения являются главными напряжениями, причём $\sigma_1=\sigma_z$, а $\sigma_3=\sigma_y$.

При решении задачи второго этапа о напряжённом состоянии пласта около скважины следует воспользоваться эпюрами напряжений в его предельно напряжённой зоне, представленных на рис. 3 или 4. В этой связи использование тех или иных эпюр зависит от расположения скважины. Если скважина бурится вблизи кровли пласта, то в расчётах нужно учитывать эпюры напряжений на рис. 3, а при бурении скважины вдоль оси пласта необходимо использовать эпюры напряжений из рис. 4.

Поскольку дегазационные скважины обычно бурятся в средней по мощности части пласта, то в данной работе приведены результаты о состоянии пласта около скважины, пробуренной вдоль оси пласта.

Из формулы (1) интенсивность деформаций образца при его разрушении одноосным сжатием получилась равной следующему значению:

$$\varepsilon_{u.O} = \frac{2}{3}\left(1+\frac{1+\sin 20^0}{1-\sin 20^0}\right)\cdot 0{,}018 = 0{,}036\,.$$

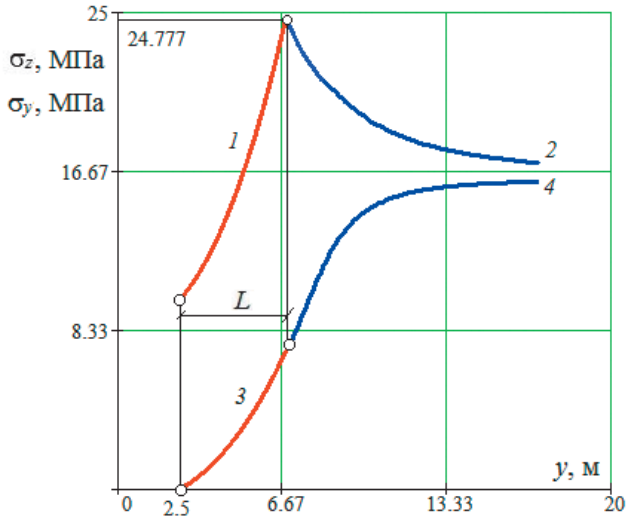

Рис. 4. Эпюры нормальных напряжений σ_z (кривые *1*, *2*) и σ_y (кривые *3*, *4*) вдоль оси пласта (оси *y*)

Результаты, показанные на рис. 5, представляют собой графики изменения интенсивностей деформаций вдоль образующих цилиндрической поверхности скважины, пробуренной вдоль оси пласта. На рис. 5 а график построен вдоль образующей, расположенной в вертикальной плоскости, а на рис. 5 б график интенсивности деформаций построен в горизонтальной плоскости. Из сравнения этих результатов следует, что значения интенсивности деформаций в вертикальной плоскости существенно выше значений интенсивности деформаций в горизонтальной плоскости.

Максимальное значение интенсивности деформаций на рис. 5 а приходится на устье скважины и составляет 0,039, это значение превышает полученное выше предельное значение интенсивности деформаций угля при одноосном сжатии, которое составляет 0,036. Таким образом, исходя из деформационного критерия разрушения горных пород, разрушение угля в устье скважины с его дальнейшим обрушением внутрь скважины приведёт скважину в этом месте к потере устойчивости.

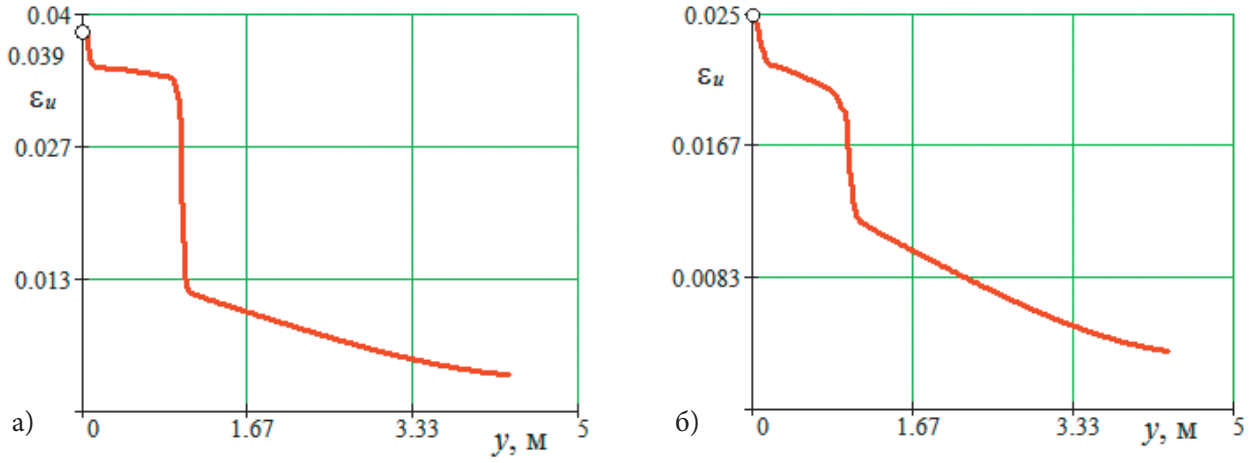

Рис. 5. Графики изменения интенсивности деформаций вдоль прямой *DG* (а) и вдоль прямой *MN* (б) около скважины, расположенной на оси пласта

ВЫВОД

Представленная двухэтапная модель геомеханического состояния пласта около скважины, пробуренной в краевой предельно напряжённой зоне пласта, базируется на зависимостях и методах механики деформируемого твёрдого тела. Модель вполне соответствует реальной картине напряжённо-деформированного состояния угольного пласта и позволяет производить прогнозные оценки состояния скважины в краевых зонах пласта, обеспечивая оптимальный размер скважины, соответствующий её устойчивому состоянию.

Анализ полученных результатов показал следующее:

1. На достаточно большой глубине отработки угольного пласта с пределом прочности 10 МПа размеры его предельно напряжённых краевых зон оказываются сопоставимы с пролётом выработки, пройденной по этому пласту.

2. Интенсивность деформаций в краевой зоне пласта резко возрастает в окрестности скважины и наибольших значений достигают вдоль линии на поверхности скважины, расположенной в вертикальной диаметральной плоскости.

3. В рамках описанной модели разрушение пласта около скважины, приводящее её в неустойчивое состояние, происходит в непосредственной близости к её устью, где достигается максимум интенсивности деформаций.

4. Для повышения устойчивости скважины, пробуренной в предельно напряжённой зоне угольного пласта в борту пластовой выработки, необходимо проведение специальных операций по укреплению краевой (приконтурной) зоны пласта.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект FWEZ-2026–0002 «Разработка методов комбинированного применения геофизических систем прогноза, контроля и управления состоянием горного массива, а также технологий предотвращения газодинамических явлений и мониторинга проведенных мероприятий по их реализации» (рег. № 1023032200092–2–1.5.1;2.7.5).

The work was performed within the framework of the state assignment of the Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Project FWEZ-2026–0002 «Development of methods for the combined application of geophysical systems for prediction, monitoring and control of the rock mass state, as well as technologies for the prevention of gas-dynamic phenomena and monitoring of the implemented measures for their realization» (Reg. No. 1023032200092–2–1.5.1;2.7.5).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Христианович С. А. Механика сплошной среды. М.: Наука, 1981. 484 с.

2. Ходот В. В. Внезапные выбросы угля и газа. М.: ГосНГИ, 1961. 363 с.

3. Фисенко Г. Л. Предельные состояния горных пород вокруг выработок. М.: Недра, 1976. 272 с.

4. Zhao B., Wen G., Sun H., et al. Similarity criteria and coal-like material in coal and gas outburst physical simulation // Int. J. Coal Sci. & Technol. 2018. Vol. 5. Iss. 2. P. 167–178.

5. Петухов И. М., Линьков А. М. Механика горных ударов и выбросов. М.: Недра, 1983. 280 с.

6. Пучков Л. А., Сластунов С. В., Коликов К. С. Извлечение метана из угольных пластов. М.: Из-во Моск. гос. горн. ун-та, 2002. 384 с.

7. Кузнецов С. В., Трофимов В. А. Газодинамика угольного пласта. Численный алгоритм, частные и приближённые решения // Горный информ.-аналит. бюлл. 2008. № 54. С. 304–324.

8. Зыков В. С. О механизме формирования выбросоопасной ситуации в очистном забое угольной шахты // Маркшейдерский вестник. 2016. № 5 (114). С. 44–48.

9. Yang D., Chen Y., Tang J. et al. Experimental research into the relationship between initial gas release and coal-gas outbursts // J. Natural Gas Science and Engineering. 2018. Vol. 50. P. 157–165.

10. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды. М.: Наука, 1990. 272 с.

11. Черданцев Н. В. Исследование предельно напряжённого состояния пласта в его краевой зоне методами механики сыпучей среды // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 3. С. 45-57. doi:10.25018/0236-1493-2020-3-0-45-57.

12. Черданцев Н. В. Исследование состояния угольного целика между очистной и подготовительной выработками методами механики деформируемого тела // Безопасность труда в промышленности. 2020. № 12. С. 26-31. doi: 10.24000/0409-2961-2020-12-26-31.

13. Черданцев Н. В., Черданцев С. В. Параметры опорного давления около очистной выработки, отрабатывающей угольный пласт с непрочными породными слоями его кровли и почвы// Безопасность труда в промышленности. 2023. № 12. С. 14–20. doi: 10.24000/0409-2961-2023-12-14-20.

14. Черданцев Н. В. Деформированное состояние угольного пласта в краевой зоне и условие его разрушения при отработке очистной выработкой // Безопасность труда в промышленности. 2023. № 8. С. 55-60. doi: 10.24000/0409-2961-2023-8-55-60.

15. Булычев Н. С. Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1984. 382 с.

16. Александров А. В., Потапов В. Д. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1990. 400 с.

17. Лурье А. И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.

18. Партон В. З., Перлин П. И. Методы математической теории упругости. М.: Наука, 1981. 688 с.

19. Качанов Л. М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.

20. Баклашов И. В. Основы геомеханики. Т. 1. М.: Моск. гос. геол. ун-т, 2004. 208 с.

21. Ставрогин А. Н., Протосеня А. Г. Механика деформирования и разрушения горных пород. М.: Недра, 1992. 224 с.

DOI: 10.25558/VOSTNII.2026.71.90.002
UDC 622.023.23
© N. V. Cherdantsev, A. E. Mayorov, 2026

N. V. CHERDANTSEV
Doctor of Engineering Sciences,
Chief Researcher
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo
e–mail: nvch2014@yandex.ru

A. E. MAYOROV
Doctor of Technical Sciences, Professor of RAS,
Acting Director of the Institute of Coal
Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry, Kemerovo
e–mail: majorov-ae@mail.ru

ABOUT THE CONDITION OF THE COAL PLATE AROUND A BOREHOLE DRIVEN IN THE SIDE OF A PREPARATORY WORKING

The peculiarity of this task is to assess the stability and destruction of the formation around a well drilled in the edge of the highly stressed formation zone located in the side of the preparatory work.

The problem is formulated and solved in two stages. In the first stage, the stress field in the highly stressed edge zone of the formation near an extended mine work is constructed within the framework of an elastoplastic plane problem. The stresses in this zone are determined using V. V. Sokolovsky's methods for a granular medium, and the conditions for transition to the ultimate state are formulated based on the general and special Coulomb-Mora criteria. At the second stage, the components of the found stress field acting at the contact of the formation with the host massif are taken as the initial stress field for a three-dimensional plastic medium in which a cylindrical-shaped cutout is located. At this stage, the stresses near the well are determined from the solution of the boundary integral equations method of the second external boundary problem of the theory of elasticity with the replacement of elastic constants with similar characteristics for a plastic material. The criterion for coal destruction is the exceeding of the maximum deformation corresponding to the destruction of a coal sample under uniaxial compression.

Keywords: COAL PLATE, MINING WORKING, BOREHOLE, STRENGTH CHARACTERISTICS, MAXIMUM STRESS ZONES, METHOD OF BOUNDARY INTEGRAL EQUATIONS.

REFERENCES

1. Khristianovich S. A. Continuum Mechanics. Moscow: Nauka. 1981. 484 p. [In Russ.].
2. Khodot V.V. Sudden emissions of coal and gas. Moscow: GosNGI, 1961. 363 p. [In Russ.].
3. Fisenko G. L. For the Limit state of rocks around an excavation. M.: Nedra, 1976. 272 p. [In Russ.].
4. Zhao B., Wen G., Sun H., et al. Similarity criteria and coal-like material in coal and gas outburst physical simulation // Int. J. Coal Sci. & Technol. 2018. Vol. 5. Iss. 2. P. 167–178.
5. Petukhov I. M., Linkov A. M. The Mechanics of Rock Bursts and Discharges. Moscow: Nedra, 1983. 280 p. [In Russ.].
6. Puchkov L.A., Slastunov S. V., Kolikov K.S. Extraction of Methane from Coal Seams. Moscow: MSMU (Moscow State Mining University) Publ., 2002. 384 p. [In Russ.].
7. Kuznetsov S.V., Trofimov V.A. Gas dynamics of a coal seam. Numerical algorithm, partial and approximate solutions // Mining Inform. &Anal. Bull. 2008. No. 54. P. 304-324. [In Russ.].
8. Zykov V.S. About the mechanism of formation of an outlier situation in the treatment face of a coal mine // Surveyor's Bulletin. 2016. No 5 (114). P. 44–48. [In Russ.].

9. Yang D., Chen Y., Tang J. et al. Experimental research into the relationship between initial gas release and coal-gas outbursts // J. Natural Gas Science and Engineering. 2018. Vol. 50. P. 157–165.

10. Sokolovsky V. V. Loose Medium Statics. M.: Nauka. 1990. 272 p. [In Russ.].

11. Cherdantsev N. V. Investigation of the extremely stressed state of the reservoir in its edge zone by methods of loose medium mechanics // Mining information and analytical Bulletin. 2020. No. 3. P. 45–57. DOI:10.25018/0236-1493-2020-3-0-45-57. [In Russ.].

12. Cherdantsev N. V. Studies of the Stress State of the Coal Pillar between the Treatment and Preparatory Workings by the Methods of Deformable Body Mechanics // Occupational Safety in Industry. 2020. No. 12. P. 26-31. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-12-26-31.

13. Cherdantsev N. V., Cherdantsev S.V. Parameters of the support pressure near the working, mining a coal seam with weak rock layers of its roof and soil // Occupational Safety in Industry. 2023. No. 12. P. 14-20. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-12-14-20. [In Russ.].

14. Cherdantsev N. V. Deformed State of the Coal Seam in the Marginal Zoneand the Condition of its Destruction during Mining by a Stope Working // Occupational Safety in Industry. 2023. No. 8. P. 55-60. DOI: 10.24000/0409-2961-2023-8-55-60.

15. Bulychev N. S. Mechanics of Underground Structures. Moscow: Nedra, 1984. 382 p. [In Russ.].

16. Alexandrov A. V., Potapov V. D. Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity. Moscow: Higher School, 1990. 400 p. [In Russ.].

17. Lurie A. I. Theory of Elasticity. Moscow: Nauka, 1970. 940 p. [In Russ.].

18. Parton V. Z., Perlin P. I. Methods of Mathematical Theory of Elasticity. Moscow: Nauka, 1981. 688 p. [In Russ.].

19. Kachanov L.M. Fundamentals of plasticity theory. Moscow: Nauka, 1969. 420 p. [In Russ.].

20. Baklashov I.V. Fundamentals of geomechanics. In 2 volumes. Vol. 1. Moscow: Izd-vo Moskovskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta, 2004. 208 p. [In Russ.].

21. Stavrogin A.N. Protosenya A.G., Mechanics of the rocks deformation and destruction. Moscow: Nedra, 1992. 224 p. [In Russ.].