

УДК 622.831

**С.В. Риб, В.А. Волошин, В.Н. Фрянов, А.А. Максимов,  
Д.М. Борзых, А.М. Никитина**

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ  
УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА ПРИ ПЕРЕХОДЕ  
ОЧИСТНЫМ ЗАБОЕМ ПЕРЕДОВОЙ ВЫРАБОТКИ**

Обоснована актуальность исследований, направленных на создание методики прогноза параметров безопасной и эффективной технологии перехода КМЗ передовых выработок. Изложены результаты численного моделирования методом конечных элементов геомеханического состояния углепородного массива в окрестности КМЗ и передовой выработки. Представлен алгоритм численного моделирования и авторский комплекс объектно-ориентированных программ для расчета параметров напряженно-деформированного состояния углепородного массива. Для численного эксперимента были выбраны горно-геологические условия по пласту 48 шахты «Ерунковская-ВIII» (Кузбасс). Проведено моделирование геомеханических процессов в окрестности диагональной печи во время входа секции механизированной крепи для сравнения НДС пород в условиях незакрепленной диагональной печи и при установке анкеров первого уровня. По характеру распределения остаточной прочности (повреждаемости) пород выявлены зоны разрушения в кровле и почве диагональной печи и очистной выработки. Предлагаемый алгоритм оценки геомеханических параметров при изменении горно-геологических и горнотехнических условий позволит разработать соответствующие профилактические мероприятия, что повысит безопасность горных работ.

**Ключевые слова:** горный массив, очистной забой, диагональные печи, напряженно-деформированное состояние, численное моделирование, метод конечных элементов, комплекс программ, целик.

---

**Н**а эффективность работы высокопроизводительных очистных комплексно-механизированных очистных забоев (КМЗ) на угольных шахтах влияет множество факторов, среди которых следует выделить снижение объемов добычи при переходе КМЗ диагональной печи, расположенной в выемочном столбе. Необходимость проведения таких выработок на стадии подготовки выемочного столба к отработке состоит в выполнении требований нормативных документов по обеспечению проветривания выработок за счет общешахтной депрессии и

выхода людей в аварийных ситуациях в пределах времени действия самоспасателей.

По результатам анализа фактических графиков добычи угля при переходе КМЗ горных выработок установлено, что нагрузка на забой снижается на 15–25 % в течение 1–2 месяцев. Сложность реализации технологии перехода передовых выработок состоит в том, что с целью исключения аварийного обрушения пород кровли по всей длине КМЗ передовые выработки проводятся диагонально относительно оси выемочного столба,

то есть все секции механизированной крепи последовательно испытывают влияние повышенного горного давления [1]. Для снижения негативного влияния горного давления, разрушенных в своде естественного равновесия пород кровли, отжима угля с боков выработки, пучения пород и вероятного горного удара при сокращении ширины угольного целика треугольной формы между КМЗ и диагональной выработкой, необходимо для разработки профилактических мероприятий осуществить прогноз геомеханического состояния сложной системы: КМЗ, диагональная передовая выработка, углепородный массив с изменяемыми свойствами горных пород [2].

Нормативные документы и методические указания, обеспечивающие прогноз параметров безопасного и эффективного перехода КМЗ передовых диагональных выработок, отсутствуют. В этой связи актуальной научно-практической задачей является создание методики прогноза параметров безопасной и эффективной технологии перехода КМЗ диагональных выработок.

Для создания такой методики предлагается использовать комплексный метод, сущность которого состоит в:

1) имитационном моделировании численным методом конечных элементов геомеханической ситуации в углепородном массиве, напряженно-деформированное состояние (НДС) которого изменяется под влиянием динамического горного давления при движении КМЗ в сторону передовой выработки;

2) настройке входных параметров модели по результатам натурных наблюдений (на стадии разработки очередного паспорта выемочного участка используются результаты натурных наблюдений на отработанных пластиах-аналогах);

3) разработке по результатам моделирования по оттестированной численной модели оптимальных режимов управления горным давлением посредством варьирования скорости подвигания КМЗ, ширины одновременно вынимаемой полосы угля в очистном забое, типов и конструкций крепи в передовой выработке, специальных мероприятий по предотвращению аварийных ситуаций;

4) мониторинге геомеханических и технологических процессов в сложной системе: КМЗ, диагональная передовая выработка, углепородный массив.

5) корректировке параметров технологии перехода КМЗ передовой выработки по результатам оперативного прогноза состояния сложной системы методами численного моделирования.

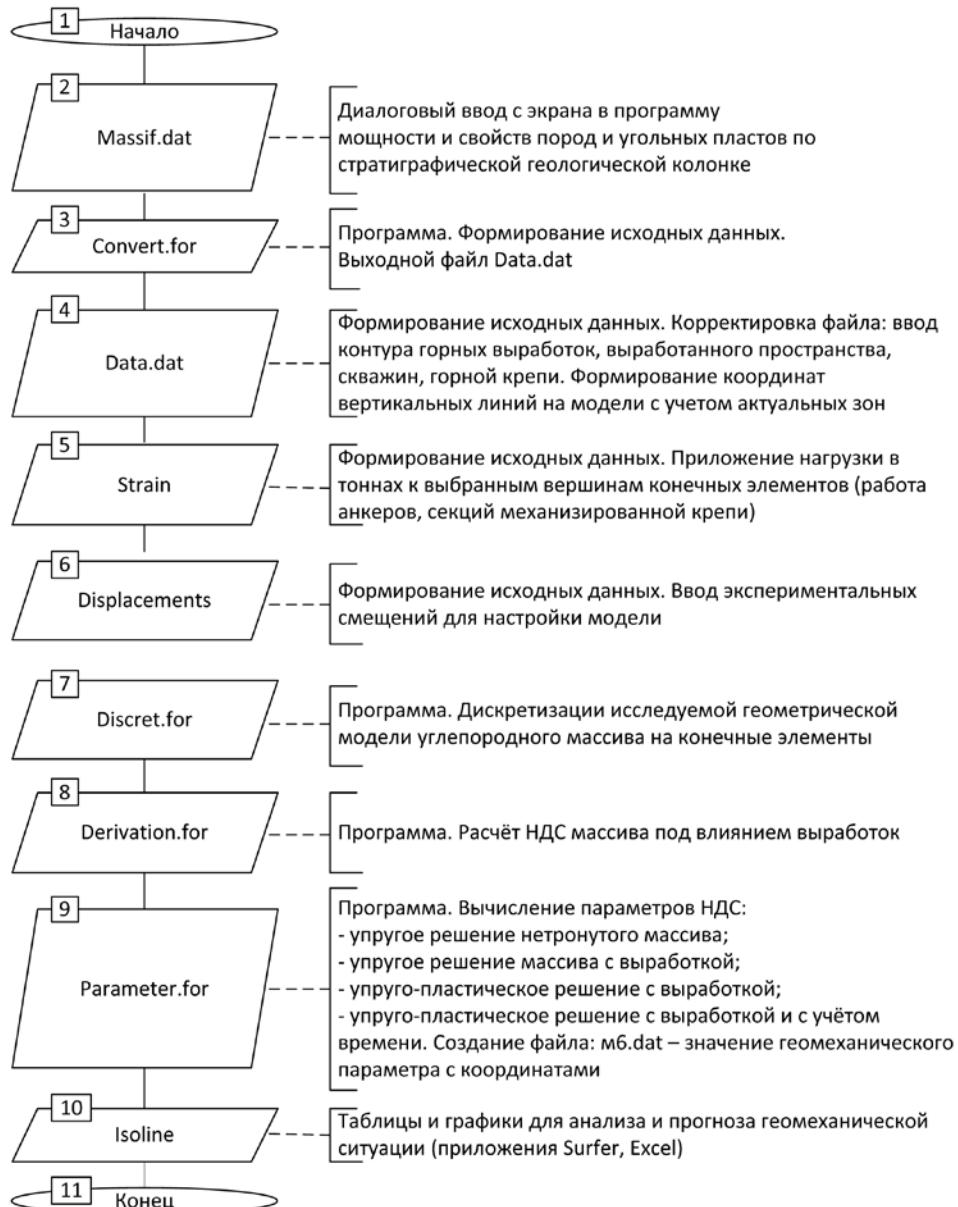
В процессе реализации разработанной методики прогнозируется вероятность образования обрушений пород кровли в КМЗ и передовой выработке, возникновения горного удара в сокращаемом угольном целике треугольной формы, отжима угля с боков выработок, пучения пород почвы. При подтверждении указанных признаков в процессе мониторинга с использованием результатов имитационного моделирования заблаговременно разрабатываются и реализуются специальные мероприятия по профилактике аварийных ситуаций [3, 4].

В настоящей статье изложены результаты исследований по первому этапу создания методики: прогноз по результатам численного моделирования геомеханического состояния углепородного массива в окрестности КМЗ и передовой выработки.

Алгоритм численного моделирования и авторский комплекс объектно-ориентированных программ разработан в Сибирском государственном индустриальном университете (СибГИУ) на кафедре геотехнологии [5, 8].

Условия и область применения комплекса программ: слоистый углепородный массив, прочностные и деформационные свойства пород по каждому слою уникальные, контакты соседних породных слоев моделиру-

ются «мягкими» прослойками, решается двумерная задача геомеханики, сетка конечных элементов неравномерная, размеры конечных элементов в зависимости от поставленной задачи принимаются в пределах 0,001–



**Рис. 1. Алгоритм расчета НДС в виде комплекса проблемно-ориентированных компьютерных программ CoalPillar для численного моделирования**

100 м, геометрические параметры модели углепородного массива ограничены размерами шахтного поля.

Адаптированный к задачам исследований в настоящей статье комплекс программ CoalPillar [6] численного моделирования методом конечных элементов [7] предназначен для расчета смещений пород, напряжений и деформаций в углепородном массиве под влиянием природных полей напряжений и техногенных напряжений, возникающих при отработке пласта. Авторские компьютерные программы выполнены на языке Фортран-90 в среде программирования Microsoft Developer Studio. Визуализация и обработка полученных результатов проводится с помощью программы Surfer.

Алгоритм расчета параметров напряженно-деформированного состояния углепородного массива в виде комплекса проблемно-ориентированных компьютерных программ CoalPillar для численного моделирования показан на рис. 1.

Пакет программ CoalPillar включает файлы исходных данных и программные модули. Варианты исходных данных и результатов моделирования накапливаются в виде базы данных и используются для анализа, обоснования выводов и закономерностей изменения НДС.

Для расчета параметров НДС сложной системы: КМЗ, диагональная передовая выработка, углепородный массив с изменяемыми свойствами горных пород использована двумерная геометрическая модель, которая включает угольные и породные слои различной мощности. Количество слоев в модели принято равным 100, а их мощность – от 0,05 до 100 м. Количество вертикальных линий на геометрической модели принимается 200 с расстоянием между ними от 0,01 до 100 м. Слои значительной мощности делятся на подслои для повышения точности рас-

чета параметров НДС. Геометрическая модель разделяется на множество конечных элементов – 40 400 треугольников.

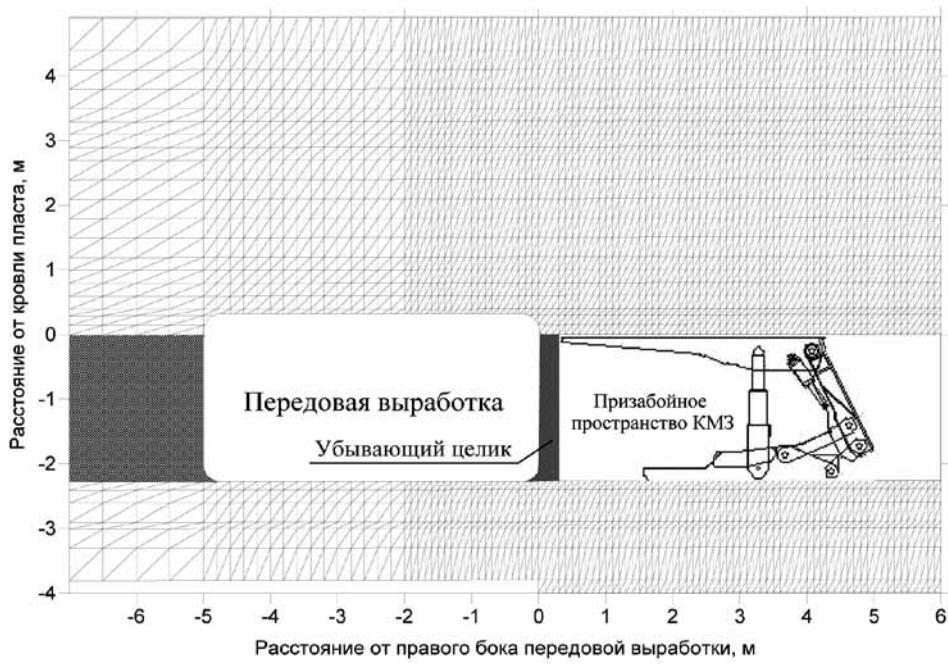
Для численного эксперимента были выбраны горно-геологические условия по пласту 48 шахты «Ерунakovская-VIII» (Кузбасс). Очистной забой 48-3 подходит к диагональной печи 48-3(2). В процессе проведения разрезной печи 48-3(2) в соответствии с утвержденным паспортом крепления выработка шириной 5,0 м и высотой 2,6 м (0,3 м присечка пород ложной кровли). В выработке установлены в каждом ряду 5 анкеров АСП20В длиной 2,2 м. Анкеры закреплены в шпурах двумя полимерными ампулами длиной 470 мм. Несущая способность анкеров согласно [5] составляет 12,5 кН. Анкеры установлены под металлический подхват из швеллера № 8, для предотвращения просыпания пород кровли применяется решетчатая затяжки ЗР2,6x1,2 из проволоки 6 мм.

В комплексе программ осуществляется автоматическая дискретизация геометрической модели производится в несколько этапов с выделением вначале четырехугольных зон по напластованиям с последующим делением на треугольники с помощью программы Discret.for.

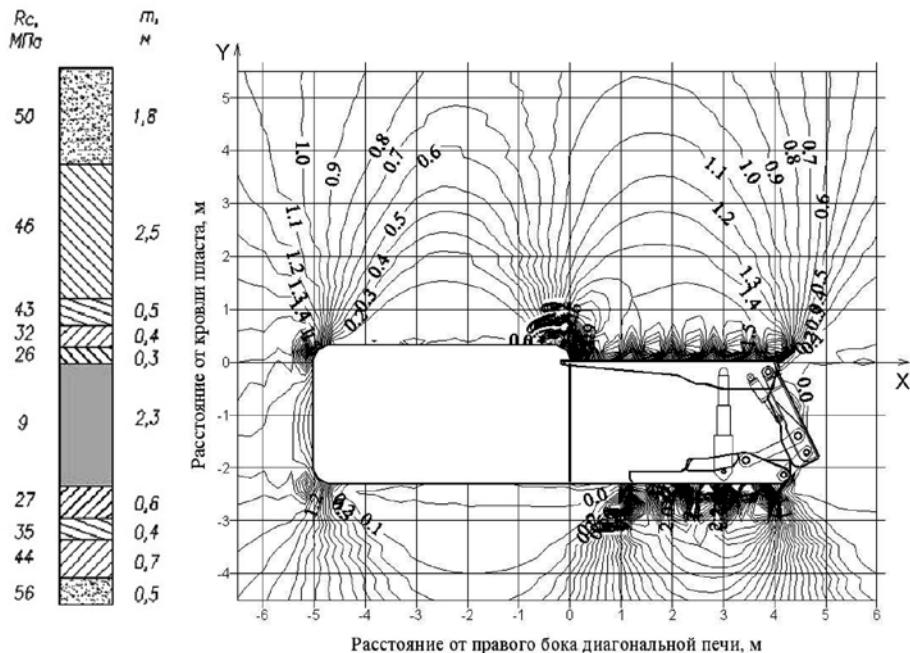
Оценка качества автоматической дискретизации модели на конечные элементы осуществляется в программе Surfer. На рис. 2 приведен фрагмент дискретизации модели на конечные элементы. В случае несоответствия положения или размеров конечных элементов реальной ситуации производится корректировка исходных данных.

При сравнении расчетных параметров за базовый вариант принятая модель массива с горной выработкой без крепления (рис. 3).

Для анализа закономерностей взаимодействия механизированной крепи



**Рис. 2. Фрагмент схемы дискретизации исследуемой геометрической модели углеродного массива на конечные элементы**



**Рис. 3. Изолинии распределения коэффициента концентрации вертикальных напряжений без крепления печи при упругопластическом решении:  $R_c$  – предел прочности пород при одноосном сжатии, МПа;  $m$  – мощность слоев пород, м**

очистного забоя и крепи диагональной печи принят наиболее критичный этап непосредственного входа секции механизированной крепи в разрезную печь, целик не существует (отработан).

На первом этапе анализа результатов проведенного моделирования геомеханических процессов в окрестности диагональной печи во время входа секции механизированной крепи рассмотрено сравнение НДС пород в условиях незакрепленной диагональной печи и при установке анкеров первого уровня.

По результатам сравнения варианта с установлением 5 анкеров первого уровня (рис. 4) с базовым установлено, что вертикальные сжимающие напряжения увеличились в кровле выработки в зоне закрепления анкеров почти в 1,5 раза, что свидетельствует о положительной работе анкеров первого уровня по армированию слоистых пород кровли над выработкой. По результатам сравнения границ зоны распределения отношения

остаточной прочности пород (рис. 5) к первоначальной установлено, что площадь вероятного сводообразования пород кровли после установки анкеров первого уровня по сравнению с базовым вариантом сокращается.

После крепления диагональной печи анкерами первого уровня происходит снижению веса пород в вероятном своде обрушения в 1,34 раза.

Из результатов анализа границ зоны остаточной прочности пород следует, что длина анкеров первого уровня 2,2 м достаточная для закрепления замков анкеров выше ожидаемого свода обрушения пород кровли.

Установка анкеров первого уровня в кровле выработки почти не влияет на возможное пучение пород почвы выработки.

При анализе горизонтальных напряжений в боках диагональной печи (левый бок) можно с большой долей вероятности утверждать, что отжим угля и пород с бока выработки в пределах 1,0 м (при незакрепленной

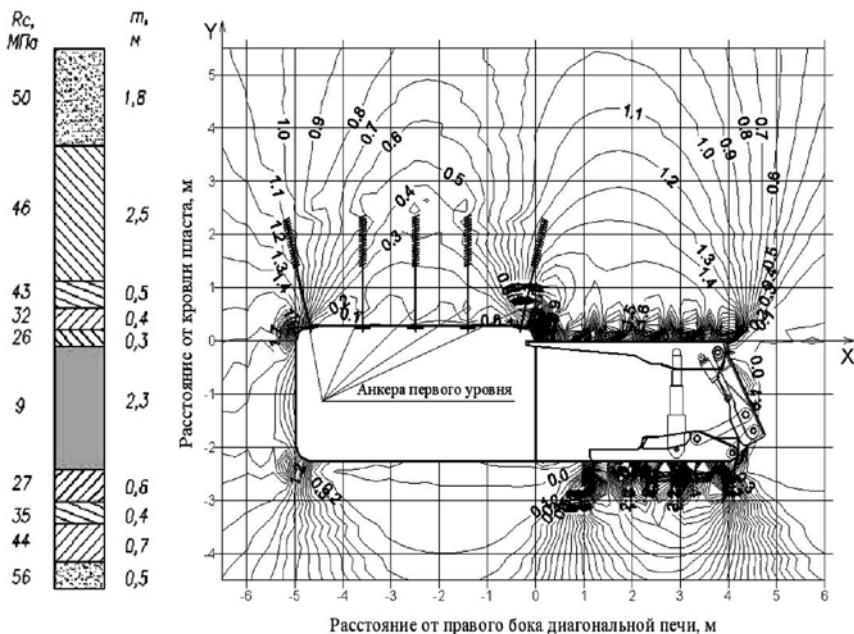
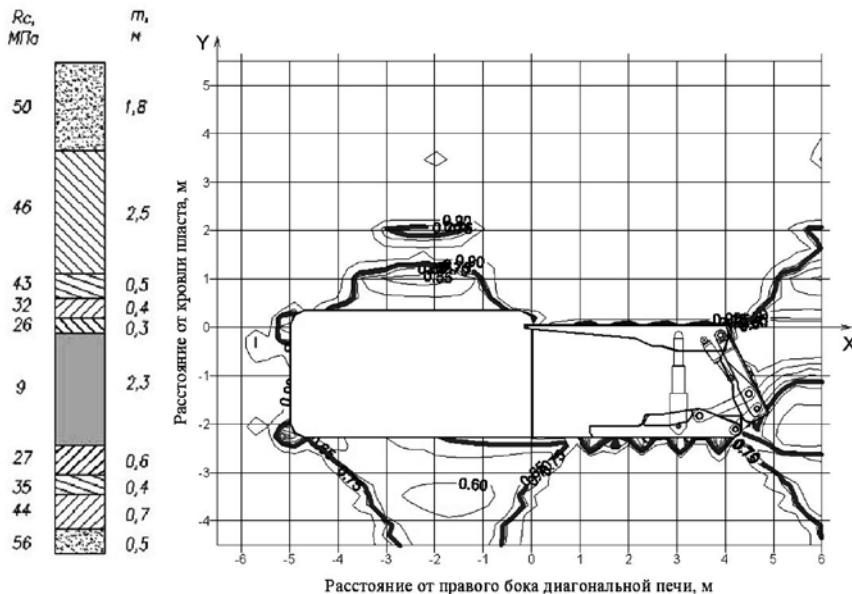


Рис. 4. Изолинии распределения коэффициента концентрации вертикальных напряжений с анкерным креплением печи при упругопластическом решении



**Рис. 5. Изолинии распределения отношения остаточной прочности пород к исходной без крепления печи при упругопластическом решении**

выработке) при работе КМЗ не представляет серьезных опасений.

В качестве основного негативного фактора при переходе очистным забоем разрезной печи можно отметить неизбежное трещинообразование в почве и боках выработки, сопровождающееся повышенным выделением метана, что требует разработки специальных мероприятий, реализация которых и повлечет снижение темпов суточного подвигания очистного забоя.

Возвведение крепи усиления в диагональной печи необходимо для ее поддержания в безаварийном состоянии на протяжении всего периода перехода выработки механизированным комплексом с учетом возможных кратковременных остановок (до двух суток).

По результатам проведенного исследования состояния приконтурного массива диагональной печи при переходе очистного забоя в условиях пласта 48 шахты «Ерунаковская-VIII» установлено:

1. При подходе механизированной крепи очистного забоя 48-3 к диагональной печи резко изменяются вертикальные и горизонтальные напряжения во вмещающих породах: вертикальные напряжения увеличиваются в 1,4–1,6 раза по сравнению с напряжениями в нетронутом массиве, а горизонтальные напряжения изменяются от сжимающих к растягивающим.

2. По характеру распределения остаточной прочности (повреждаемости) пород выявлены зоны разрушения в кровле и почве диагональной печи и очистной выработки.

3. Предлагается для поддержания диагональной печи в безаварийном состоянии в процессе перехода ее очистным механизированным комплексом очистного забоя устанавливать анкерную крепь первого уровня и возводить крепь усиления (рудничные стойки, канатные анкера).

4. По результатам сравнения влияния крепи на распределение напряжений пород обоснованы режимы ра-

боты КМЗ и технология поддержания печи для обеспечения высокопроизводительной и безопасной работы очистного забоя в период перехода диагональной печи.

5. Обоснованные рекомендации предлагаются использовать для составления оптимальных паспортов крепления и усиления крепи диагональных печей для безаварийного перехода очистного забоя и оптимизации процесса крепления и усиления выработки в условиях, аналогичным пласту 48 шахты «Ерунаковская-VIII».

Таким образом, разработанная модель численного моделирования позволит прогнозировать параметры НДС углепородного массива при переходе очистным забоем печей на стадии разработки паспортов выемочных участков и другой проектной документации, а предлагаемый алгоритм оценки геомеханических параметров при изменении горно-геологических и горнотехнических условий позволит разработать соответствующие профилактические мероприятия, что повысит безопасность горных работ.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузьменко А.М., Козлов А.А., Хейло А.В. К вопросу перехода очистными работами техногенных ослабленных зон во вмещающих породах без демонтажа механизированного комплекса / Материалы международной конференции «Форум горняков-2009». – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2009. – С. 132–136.
2. Хомякова А.А., Риб С.В., Никитина А.М. Исследование влияния убывающего целика на напряженно-деформированное состояние пород почвы горной выработки / Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Новокузнецк, 2014. – С. 5–8.
3. Нураглиев Е.И., Шмат В.Н., Майоров А.Е. Эффективные технологии упрочнения массива для проезда очистного комплекса через горные выработки // Уголь. – 2013. – № 10. – С. 16–19.
4. Климчук И.В., Маланченко В.М., Ермаков А.Ю., Биктимиров И.С. Применение полимерных смол на шахтах Кузбасса // Горная промышленность. – 2009. – № 9. – С. 15–18.
5. Фрянов В.Н., Павлова Л.Д. Состояние и перспективы развития безопасной технологии подземной угледобычи. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. – 238 с.
6. Риб С.В., Басов В.В., Никитина А.М., Борзых Д.М. Численное моделирование геомеханического состояния неоднородных угольных целиков методом конечных элементов / Наукоменные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сборник научных статей. – Новокузнецк, 2014. – С. 123–128.
7. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
8. Фрянов В.Н., Степанов Ю.А. Программа подготовки данных для проведения расчетов геомеханических параметров угольных шахт методом конечных элементов // Свидетельство об официальной регистрации программы на ЭВМ № 2000610937; Заявка № 2000610798 от 24.06.2000. Зарегистр. 21.09.2000. – М.: Роспатент, 2000. ГИАС

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Риб Сергей Валерьевич – старший преподаватель, e-mail: seregarib@yandex.ru,  
Волошин Владимир Анатольевич – кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: voloshiniva1966@gmail.com,  
Фрянов Виктор Николаевич – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой,  
e-mail: fryanov@sibsiu.ru,  
Сибирский государственный индустриальный университет;  
Максимов Артем Александрович – генеральный директор,  
ООО «Запсиб Проминжиниринг», e-mail: info@zspi.pro;  
Борзых Дмитрий Михайлович – старший преподаватель, e-mail: 25borz@rambler.ru,  
Никитина Анастасия Михайловна – кандидат технических наук, доцент,  
e-mail: nik.am\_78@mail.ru,  
Сибирский государственный индустриальный университет.

## NUMERICAL MODELING BY FINITE ELEMENT METHOD OF STRESS-STRAIN STATE OF COAL ROCK MASS AT THE TRANSITION LONGWALL ADVANCED WORKING

Rib S.V.<sup>1</sup>, Senior Lecturer, e-mail: seregarib@yandex.ru,  
Voloshin V.A.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: voloshinva1966@gmail.com,  
Frianov V.N.<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Chair, e-mail: fryanov@sibsiu.ru,  
Maksimov A.A.<sup>2</sup>, General Director, e-mail: info@zspi.pro,  
Borzyh D.M.<sup>1</sup>, Senior Lecturer, e-mail: 25borz@rambler.ru,  
Nikitina A.M.<sup>1</sup>, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, e-mail: nik.am\_78@mail.ru,  
<sup>1</sup> Siberian State Industrial University, 654007, Novokuznetsk, Russia,  
<sup>2</sup> Ltd. «Zapsib Promengineering», 654000, Novokuznetsk, Russia.

---

In the work the urgency of research aimed at the creation of the forecast methodology parameters safe and effective technology transfer CMH advanced workings. In this paper we present the results of numerical modeling by finite element method geomechanical condition of coal rock mass in the vicinity of the CMH and best production. An algorithm for the numerical modeling and field complex object-oriented programs for calculating the parameters of the stress-strain state of coal rock mass. For the numerical experiment were selected mining and geological conditions on the formation of 48 mine "Erunakovskaja-VIII" (Kuzbass). Mining face 48-3 suited to the diagonal of the furnace 48-3 (2). The modeling of geomechanical processes in the neighborhood of the diagonal of the furnace during the login section mechanized system for comparing SSS loose rocks under the diagonal of the furnace and during the installation of the anchors of the first level. At the approach of powered support longwall 48-3 to diagonal ovens vary sharply vertical and horizontal stresses in the host rocks: vertical stress increases by 1.4-1.6 times in match against the stresses in an array of untouched and horizontal stresses change from compressive to tensile. By the nature of the distribution of residual strength species identified in the roof zone of destruction and soil cutting and cleaning furnace production. The proposed algorithm estimates the geomechanical parameters when changing geological and mining conditions will allow to develop appropriate preventive measures that will increase the safety of mining operations.

**Key words:** rock mass, mining face, diagonal furnaces, stress-strain state, numerical modeling, finite element method, software system, pillar.

### REFERENCES

1. Kuz'menko A.M., Kozlov A.A., Kheilo A.V. Materialy mezdunarodnoi konferentsii «Forum gornjakov-2009» (Miners' Forum-2009 International Conference Proceedings), Dnepropetrovsk, NGU, 2009, pp. 132-136.
2. Khomyakova A.A., Rib S.V., Nikitina A.M. Nauka i molodezh': problemy, poiski, resheniya: trudy vserossiiskoi nauchnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (Science and Youth: Problems, Search, Solutions: Proceedings of All-Russian Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists), Novokuznetsk, 2014, pp. 5-8.
3. Nurgaliev E.I., Shmat V.N., Maiorov A.E. *Ugol'*. 2013, no 10, pp. 16-19.
4. Klimchuk I.V., Malanchenko V.M., Ermakov A.Yu., Biktimirov I.S. *Gornaya promyshlennost'*. 2009, no 9, pp. 15-18.
5. Fryanov V.N., Pavlova L.D. *Sostoyanie i perspektivy razvitiya bezopasnoi tekhnologii podzemnoi ugledobychi* (State-of-the-art and development prospects of safe underground coal mining technology), Novosibirsk, Izd-vo SO RAN, 2009, 238 p.
6. Rib S.V., Basov V.V., Nikitina A.M., Borzykh D.M. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov: sbornik nauchnykh statei Novokuznetsk* (High-technologies of mineral mining and use: Collection of scientific papers), Novokuznetsk, 2014, pp. 123-128.
7. Fadeev A.B. *Metod konechnykh elementov v geomehanike* (Finite element method in geomechanics), Moscow, Nedra, 1987, 221 p.
8. Fryanov V.N., Stepanov Yu.A. *Programma podgotovki dannykh dlya provedeniya raschetov geomechanicheskikh parametrov ugol'nykh shakht metodom konechnykh elementov* (Program of data preparation for finite element method-based calculation of geomechanical parameters for coal mines), Moscow, Rospatent, 2000.

