

ISSN 2500-0632 (ON-LINE)



ГОРНЫЕ НАУКИ И

TOM
VOL. 4, №3
2019

ТЕХНОЛОГИИ

MINING SCIENCE AND TECHNOLOGY



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»
NATIONAL UNIVERSITY OF SCIENCE
AND TECHNOLOGY MISIS

СОДЕРЖАНИЕ

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ

РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

- Разработка способа дегазации газонасыщенных пологих угольных пластов гидродинамическим воздействием** 160
Гаврилов В. И.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В МИНЕРАЛЬНО-СЫРЬЕВОМ КОМПЛЕКСЕ И ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

- Основные факторы неблагоприятного воздействия на окружающую среду деятельности калийного производства и способы ее защиты** 172
Высоцкая Н. А., Пискун Е. В.

- Анализ распространения загрязняющих веществ на примере верховьев р. Ист Джиу**..... 181
Симион А.Ф., Лазар М., Дребенштедт К.

ГОРНЫЕ МАШИНЫ, ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

- Диагностирование теплового состояния электромеханического оборудования** 188
Борисенко В. Ф., Землянский А. И., Сидоров В. А., Сидорова Е. В.

СВОЙСТВА ГОРНЫХ ПОРОД, ГЕОМЕХАНИКА И ГЕОФИЗИКА

- Особенности механизма формирования нагрузки на систему «крепь-межрамное ограждение»** 202
Петренко Ю. А., Касьян Н. Н., Касьяненко А. Л.

- Использование свойств дискретных пород для оптимизации процессов погашения выработанного пространства**..... 213
Голик В. И., Буй Хуан Нам, Масленников С. А., Анищенко В. И.

- Конечно-элементное моделирование многофазного течения в нефтенасыщенных пластах-коллекторах – Comsol Multiphysics как инструмент быстрого создания упрощенной модели при моделировании пласта**..... 220
Нассан Т. Х., Амро М.

CONTENTS

ORIGINAL PAPERS

EXPLOITATION OF MINERAL RESOURCES

- Development of a hydrodynamic method for degassing of gas-saturated flat-lying coal seams** 160
V. I. Gavrilov

PROCESS SAFETY IN MINING AND PROCESSING INDUSTRY AND ENVIRONMENTAL PROTECTION

- The main factors of adverse environmental impact of potash production and methods of environmental protection** 172
N. A. Vysotskaya, E. V. Piskun
- Behaviour of pollutants in the upper reaches of east Jiu River case study**..... 181
A. F. Simion, M. Lazar, C. Drebenstedt

MINING MACHINERY, TRANSPORT, AND MECHANICAL ENGINEERING

- Diagnostics of thermal condition of electromechanical machinery**..... 188
V. F. Borisenko, A. I. Zemlyansky, V. A. Sidorov, E. V. Sidorova

ROCK CHARACTERISTICS. GEOTECHNIC SURVEY AND GEOPHYSICS

- Features of origination of load on "support-Interframe shield" system** 202
Y. A. Petrenko, N. N. Kasyan, A. L. Kasyanenko
- Using properties of discrete rocks to optimize backfilling** 213
V. I. Golik, Xuan Nam Bui, S. A. Maslennikov, V. I. Anischenko
- Finite element simulation of multiphase flow in oil reservoirs – Comsol Multiphysics as fast prototyping tool in reservoir simulation** 220
T. H. Nassan, M. Amro

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-160-171

**Разработка способа дегазации газонасыщенных пологих угольных пластов
гидродинамическим воздействием**

Гаврилов В. И.

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Днепр, Украина,
✉gawrilov.slawick@yandex.ru

Аннотация: Ухудшение горно-геологических условий подземной разработки угольных месторождений с глубиной приводит к значительному газовыделению в горные выработки, которое на отдельных шахтах достигает 45 м^3 и выше на 1 т добытого угля. Существующие нормативные способы дегазации напряженных угольных пластов часто не обеспечивают необходимой для ритмичной работы очистных забоев эффективности дегазации 50 % и выше. В некоторых условиях можно достичь эффективности скважинной дегазации 30 %, что позволяет увеличить нагрузку на лаву до 1 000 т/сут при газовыделении из пласта до $5 \text{ м}^3/\text{мин}$. Однако на глубинах 1 000–1 300 м при высокопроизводительной работе очистных комплексов выделение газа может достигать $170 \text{ м}^3/\text{мин}$, что приводит к остановкам забоев по газовому фактору и сдерживает темпы ведения очистных и подготовительных работ. Кроме того, предварительная дегазация пластов осуществляется довольно продолжительное время. Современные достижения в области гидроразрушения горных пород являются основой для разработки малоэнергоёмких безопасных и экологически чистых технологий дегазации напряженных газонасыщенных угольных пластов. В статье приведены результаты исследований влияния гидродинамического воздействия (ГДВ) на газонасыщенный пологий угольный пласт и разработки способа дегазации и снижения газодинамической активности напряженных угольных пластов в горные выработки ГДВ. Установлено химическое взаимодействие части свободных радикалов угля с молекулами воды и продуктами ее гидролиза, в результате которого образуются устойчивые соединения, что приводит к снижению концентрации парамагнитных центров (ПМЦ) в угле, и соответственно к уменьшению сорбционного взаимодействия. Шахтными экспериментами впервые установлено влияние гидродинамического воздействия на протекание геомеханических и газодинамических процессов в угольном массиве при образовании зоны интенсивного газовыделения. Разработаны технология и схема дегазации газонасыщенных пологих угольных пластов гидродинамическим воздействием, предусматривающие разделение в пространстве и времени процессов добычи угля и дегазации пластов.

Ключевые слова: буровые скважины, напряженно-деформированное состояние пласта, гидродинамическое воздействие, интенсификация дегазации угольного пласта, параметры ГДВ, схемы дегазации напряженных пластов.

Для цитирования: Гаврилов В. И. Разработка способа дегазации газонасыщенных пологих угольных пластов гидродинамическим воздействием. *Горные науки и технологии*. 2019;4(3):160-171. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-160-171.

**Development of a Hydrodynamic Method for Degassing
of Gas-Saturated Flat-Lying Coal Seams**

V. I. Gavrilo

Geotechnics Institute named after N.S. Polyakov, NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine,
✉gawrilov.slawick@yandex.ru

Abstract: Deterioration of geological and mining conditions for underground extraction of coal deposits with increasing depth leads to significant gas release into mine workings, reaching 45 м^3 or more per 1 ton of coal mined at some mines. Existing standard methods for degassing of stressed coal seams often do not provide required degassing efficiency of 50 % and more for rhythmic operation of production faces. In some conditions, open-hole degassing efficiency of 30 % can be achieved, which allows to increase output per face up to 1,000 tpd with gas release from seam up to $5 \text{ м}^3/\text{min}$. However, at depths of 1,000–1,300 m and high-performance operation of longwall sets of equipment, gas release can reach $170 \text{ м}^3/\text{min}$ that causes face stoppages due to gas hazard and slows down the



pace of stope development and stoping. In addition, preliminary seam degassing requires rather long time. Modern achievements in the field of rock hydraulic fracturing are the basis for the development of low-energy safe and environmentally friendly technologies for degassing of stressed gas-saturated coal seams. The paper presents the findings of our studies on hydrodynamic action (HDA) on a gas-saturated flat-lying coal seam and the developed method for degassing and reduction of gas-dynamic activity of stressed coal seams in mine workings. Chemical interaction of some coal free radicals with water molecules and hydrolysis products has been revealed, resulting in formation of stable compounds. This leads to decreasing concentration of coal paramagnetic centers (PMC) and sorption activity. Our mine tests have for the first time found hydrodynamic effects on geotechnical and gas-dynamic processes in a coal mass during formation of a zone of intense gas release. Technology and layout for hydrodynamic action-based degassing of gas-saturated flat-lying coal seams have been developed, providing for spatial and time separation of seam degassing and coal extraction processes.

Keywords: boreholes, seam stress-strain state, hydrodynamic effects, coal seam degassing intensification, HDA parameters, stressed seam degassing layout.

For citation: Gavrilov V. I. Development of a hydrodynamic method for degassing of gas-saturated flat-lying coal seams. *Mining Science and Technology*. 2019;4(3):160-171 (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-160-171.

Введение

Увеличение глубины и интенсивности горных работ сопровождается повышением газообильности шахт, что приводит к росту затрат, снижению производительности и безопасности труда. Неблагоприятная динамика травматизма от взрывов газа и пыли, проявления разного рода газодинамических явлений вызывают тяжелые социальные и экономические последствия [1–3].

В современных условиях газовыделение из отрабатываемых пластов может достигать 45 м³/т и выше. Без кардинального снижения выделения газа в выработки и в первую очередь из угольного пласта невозможно обеспечить высокий уровень угледобычи. Для рентабельной работы механизированного комплекса эффективность дегазации должна быть не менее 50 %. Применение традиционных способов дегазации и снижения газодинамической активности угольных пластов, основанных на бурении дегазационных скважин, с увеличением глубины разработки резко сократилось в связи с уменьшением радиуса эффективного влияния скважин. Эффективность дегазации пласта может быть несколько повышена за счет проведения активных воздействий на углегазонасыщенную толщу, таких как, например, поинтервальный гидроразрыв, двухкаскадное нагнетание жидкости, гидроимпульсное воздействие и др.,

однако эти локальные технологии крайне редко применяются в связи со сложностью их реализации в ограниченных подземных условиях, большой вероятностью прорывов воды в горные выработки и, главное, недостатком времени на кропотливую и масштабную работу [4–7].

Учеными ИГТМ НАН Украины разработан и внедрен на шахтах Донбасса экологически чистый и малоэнергоёмкий метод гидродинамического воздействия (ГДВ) на угольный пласт рабочим агентом (водой), что приводит к перераспределению сил горного и газового давления, разупрочнению угля и, таким образом, десорбции метана. На базе метода разработаны и внедрены способы вскрытия выбросоопасных угольных пластов квершлагами и предупреждения выбросов газа и угля в нижней части пластов, отрабатываемых щитовыми агрегатами, которые являются нормативными [8].

Разгрузка гидродинамическим воздействием газонасыщенного угольного пласта, содержащего сорбированный метан в замкнутых изолированных между собой порах, а в зонах максимальных сжимающих напряжений пласт переходит в нарушенную структуру V типа, в которой радиусы пор сравнимы с размерами сорбированных молекул, приводит к увеличению проницаемости, появлению трещин и объединению их в фильтрационные

каналы, по которым свободный и сорбированный метан движется в направлении скважины. Вследствие гидродинамического воздействия разрушается угольный пласт и часть угля извлекается из массива. Это приводит к уменьшению несущей способности пласта и ослаблению межслоевых контактов в породах кровли, что при отработке пласта обеспечивает равномерное (без задержек) развитие деформаций и исключает проявление внезапных выбросов угля и газа [9].

Основная идея работы заключается в использовании установленных закономерностей протекания геомеханических и газодинамических процессов при гидродинамическом воздействии на газонасыщенный угольный пласт через подземные скважины и особенностей процессов газовыделения из пласта в подземные горные выработки после проведения профилактических работ для установления эффективных параметров способа ГДВ на пологие угольные пласты и схемы его реализации в промышленных условиях.

Для достижения поставленной цели осуществляется решение следующих задач:

– изучить причины недостаточной эффективности существующих способов дегазации углепородного массива и обосновать перспективность гидродинамического воздействия;

– установить закономерности протекания геомеханических и газодинамических процессов при гидродинамическом воздействии на пласт через подземные скважины и особенности процесса газовыделения из пластов в подземные горные выработки после проведения профилактических работ;

– установить технологические параметры способа ГДВ для пологих пластов и разработать перспективную технологическую схему дегазации пластов гидродинамическим воздействием.

Методы исследования. Анализ эффективности традиционных способов и средств

дегазации шахт; лабораторные, шахтные исследования и промышленные испытания гидродинамического способа дегазации угольных пластов с использованием метода статистической обработки данных; механические и геофизические методы шахтных инструментальных измерений.

Результаты исследования. Основные способы дегазации, их недостатки и преимущества подробно изложены в работах А. Т. Айруни, Г. Д. Лидина и других авторов [10–13].

По результатам анализа эффективности традиционных способов и средств дегазации угольных пластов установлено следующее:

– дальнейший рост нагрузки на очистные забои возможен только при эффективном решении проблемы управления газодинамическим состоянием углепородного массива;

– традиционные средства борьбы с метаном в угольных шахтах в условиях постоянной интенсификации горных работ и перехода на все более глубокие горизонты часто уже не могут обеспечить одновременно высокий уровень угледобычи и безопасные условия труда. Эффективность пластовой подземной дегазации ограничивается величиной коэффициента дегазации 0,2 и может быть несколько повышена путем проведения активных воздействий на углегазонасыщенную толщину (например, поинтервальный гидроразрыв, газогидроимпульсное воздействие и др.), однако эти локальные технологии крайне редко применяются из-за сложности их реализации в стесненных подземных условиях, большой вероятности прорывов воды в горные выработки и недостатка времени на кропотливую и масштабную работу;

– гидродинамический способ дегазации газонасыщенных пологих угольных пластов требует теоретических и экспериментальных обоснований, а также широкой проверки на шахтах.

Любое, в том числе и техногенное, нарушение равновесия в системе «уголь–газ»

приводит к диффузным, фильтрационным, сорбционно-десорбционным процессам и, что наиболее существенно, к генерации метана в угольном пласте [14]. Выход системы из состояния равновесия сводится к повышению или понижению давления. При этом изменяется соотношение свободного и сорбированного газа. Переход газа из сорбированного состояния в свободное и наоборот может осуществляться с разной скоростью. Информация об изменении кинетических параметров имеет большую практическую ценность для дегазации угольного пласта и снижения его газодинамической активности.

Влияние гидродинамического воздействия на степень дегазации угольных пластов исследовалось методом электронного парамагнитного резонанса (ЭПР). Использование вычислительной техники во время проведения экспериментов и регистрации сигнала позволили выйти на значительно более высокий уровень информативности, точности и достоверности полученной информации.

Эксперименты проводились по ранее отработанным методикам, содержащим регистрацию спектра поглощения сверхвысоко-частотной энергии (СВЧ) парамагнитными центрами (ПМЦ) угля при нормальных условиях и на момент стабилизации при повышении давления до 6 МПа [15–18]. Использование системы «ЭПР-ПК» дало возможность с высокой точностью зарегистрировать переходный процесс во времени и исследовать его параметры.

Исследование кинетических параметров взаимодействия угля и газа проводилось на угольных пробах, отобранных с пластов l_4 ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько» и l_3^1 ш/у «Суходольское-Восточное» в процессе проведения гидродинамического воздействия.

Аппроксимация переходного процесса проводилась по экспоненциальному закону, характерному для быстротекающих

газодинамических явлений в угольных пластах [19]:

$$I = I_{\text{исх}} - K_N \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right),$$

где I – интегральная интенсивность спектра ЭПР угольного образца; $I_{\text{исх}}$ – интегральная интенсивность исходного спектра ЭПР угольного образца; K_N – коэффициент пассивации, отражающий процентное содержание в угле парамагнитных центров, способных к взаимодействию с газом, %; t – текущее время, с; T – постоянная времени переходного процесса, с.

Лабораторными исследованиями установлено, что в результате гидродинамического воздействия в вынесенном струей воды угле концентрация парамагнитных центров примерно в 3 раза меньше по сравнению с первоначальными значениями. Гидролиз угля приводит к разрыву различных связей и изменению компонентного состава. Под действием циклических механических воздействий осуществляется деструкция угольных связей в ароматическом ядре молекулы угля. Очевидно, что в процессе ГДВ происходит взаимодействие угля с молекулами воды и продуктами ее гидролиза, при этом образуются устойчивые соединения, что приводит к снижению концентрации ПМЦ в угле и соответственно к уменьшению сорбционного взаимодействия (табл. 1).

Таким образом, гидродинамическое воздействие влияет на межмолекулярное механохимическое взаимодействие угля и газа, сорбционные свойства угля и увеличивает его нарушенность, что повышает степень дегазации пласта.

Реализация в промышленных условиях гидродинамического способа дегазации и снижения газодинамической активности газонасыщенных пологих угольных пластов l_4 ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько» и l_3^1 ш/у «Суходольское-Восточное» достаточно полно освещена в работах [20–22].

Таблица 1

Кинетические параметры переходного процесса взаимодействия угля и газа после ГДВ на пласте l_4 (3-й западный конвейерный штрек)

Kinetic parameters of transient process of coal and gas interaction after HDA in l_4 seam (3rd western belt heading)

Номер пробы	Выход летучих веществ V^{adv} , %	Зольность A , %	Концентрация ПМЦ $N^c \times 10^{19}$, $г^{-1}$	Коэффициент пассивации K_N , %	Постоянная времени T_N , с	Пределная сорбционная способность Q , мг/г	Ширина линии ΔH , Э	Изменение ширины линии $K_{\Delta H}$, %
592	33,20	1,24	3,79	35,5	94,7	9,96	7,2	4,3
593	30,15	2,91	3,24	38,1	61,7	9,13	7,4	9,0
594	27,33	3,72	3,70	37,0	79,3	10,13	6,8	13,2
595	29,17	2,00	3,34	35,2	81,4	8,70	7,5	5,1
596	31,15	1,50	3,94	35,2	94,7	10,26	7,4	5,4
597	28,20	3,00	3,43	37,5	72,1	9,52	7,2	6,5

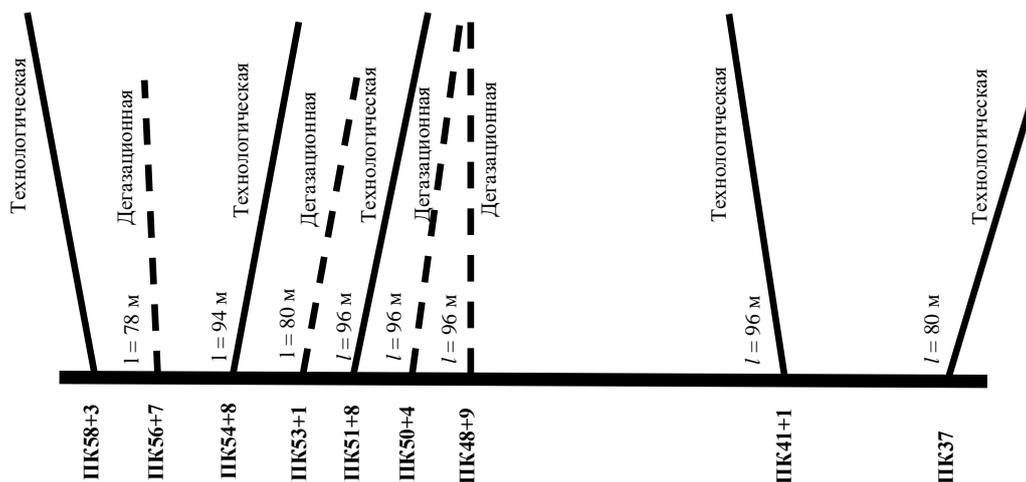


Рис. 1. Схема расположения скважин в 23-й восточной уклонной лаве

Fig. 1. Drilling pattern in the 23rd eastern inclined longwall



Рис. 2. Изменение дебита дегазационной скважины на ПК53+1 м после ГДВ

Fig. 2. Change in degassing borehole flow rate at Picket53+1 m after HDA

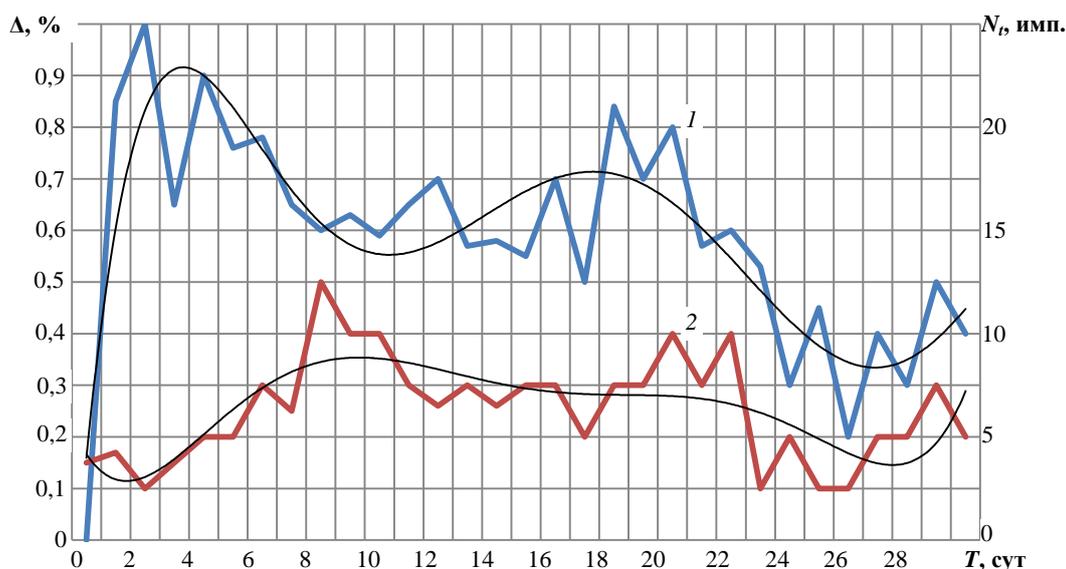


Рис. 3. Характер изменения геомеханических и газодинамических характеристик пласта I_1 при производстве ГДВ:

1 – акустическая эмиссия; 2 – прирост концентрации метана

Fig. 3. Trends of geotechnical and gas-dynamic characteristics for I_1 seam in the process of HDA:

1 – acoustic emission; 2 – methane concentration increment

В конвейерном штреке 23-й восточной уклонной лавы ш/у «Суходольское-Восточное» бурились пять технологических и четыре дегазационные скважины. Схема расположения скважин представлена на рис. 1.

Наблюдения показали, что во время работы подземных скважин метановыделение из них происходит неравномерно. После гидродинамического воздействия наблюдается повышенное выделение метана, которое на 60–100 сут достигает максимума, а затем происходит постепенное его снижение. На рис. 2 приведены результаты замеров дебита дегазационной скважины после ГДВ на различном расстоянии до лавы.

После гидродинамического воздействия через технологическую скважину метановыделение в дегазационной скважине постепенно снижается, достигая минимального значения при подходе лавы к скважине на расстояние 120–100 м. Это объясняется снижением содержания свободного метана в пласте и влиянием опорного давления.

При дальнейшем приближении лавы к скважинам метановыделение из них постепенно растет в связи с перераспределением сил горного давления и развитием дополни-

тельной системы трещин в результате обрушения пород кровли.

Максимальные значения метановыделения из скважин зафиксированы при нахождении лавы на расстоянии 15–20 м. После этого выход газа из скважин снижается вплоть до пересечения их забоем лавы из-за быстро увеличивающегося объема трещин, соединяющих скважины с очистным забоем, снижения количества свободного газа в угле и выделением метана непосредственно в лаву.

Всего из технологических скважин выделилось более 199 тыс. м³ метана. Срок работы таких скважин в среднем составлял 60 сут со средним дебитом 416 м³/сут, количество выделившегося метана из одной скважины – более 25 тыс. м³.

Проведение гидродинамического воздействия на газонасыщенный угольный пласт с периодическим извлечением метана и части дезинтегрированного угля из подземных скважин приводит к перераспределению напряжений в горном массиве, которое описывается статистическими характеристиками динамики активности акустической эмиссии (АЭ) [23]. В свою очередь, изменение напряженно-деформированного состоя-

ния угля и пород оказывает существенное влияние на изменение интенсивности газовыделения [24].

Изменение геомеханического состояния углепородного массива оценивали по акустической эмиссии с помощью звукоулавливающей аппаратуры (ЗУА). Способ установки сейсмоприемника и радиус его действия определяли согласно [25].

На рис. 3 приведены результаты мониторинга характера изменения геомеханических и газодинамических процессов пласта l_1 при трехкратном гидродинамическом воздействии через технологическую скважину, пробуренную на ПК42+5 м.

Анализ графиков показывает согласованную динамику процессов на отдельных участках. Просматривается общая тенденция к запаздыванию локальных максимумов прироста концентрации метана по отношению к локальным максимумам АЭ. Так, в результате первого цикла локальный максимум активности акустической эмиссии зафиксиро-

ван на третьи сутки, а локальный максимум прироста концентрации метана в воздушной струе выработки – на шестые сутки. Аналогично после второго цикла воздействия, осуществленного через 15 сут от времени первого воздействия, зафиксированы локальные максимумы прироста концентрации метана и активности АЭ на 17-е и 21-е сутки соответственно. После третьего цикла воздействия на 24-е сутки локальные максимумы Δ и АЭ зафиксированы на 27-е и 28-е сутки соответственно.

Таким образом, по результатам исследований в одних и тех же горно-геологических условиях влияния ГДВ на взаимодействие геомеханических и газодинамических процессов установлено запаздывание локальных максимумов концентрации метана во времени от максимумов акустической эмиссии на 1–5 сут. Характер изменения процессов описывается полиномом шестой степени.

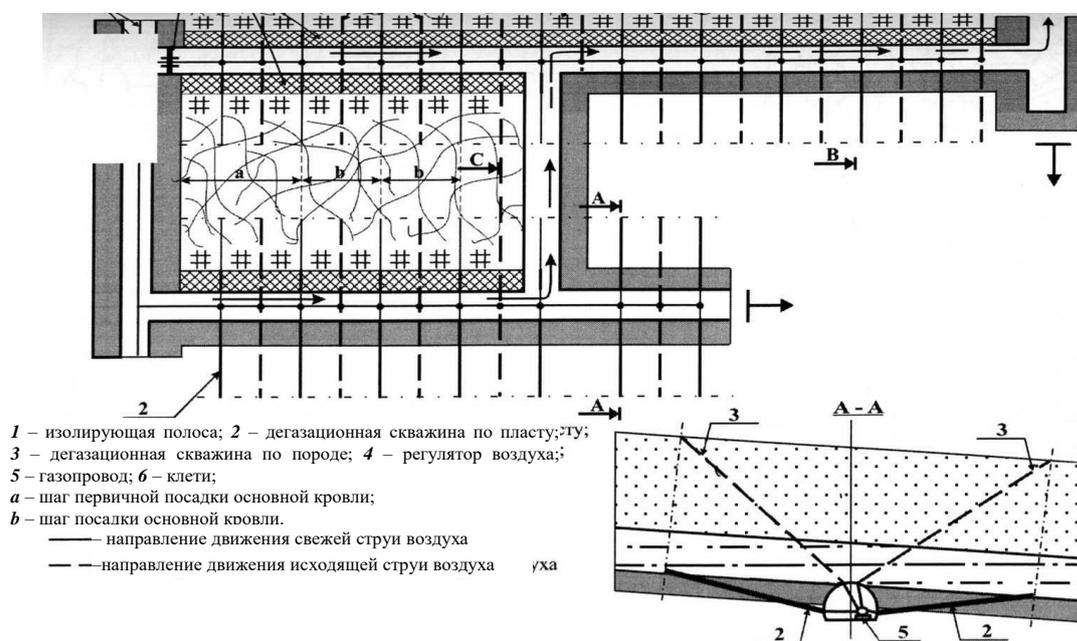


Рис. 4. Технологическая схема дегазации пологого угольного пласта с применением гидродинамического воздействия

Fig. 4. Arrangement of flat-lying coal seam degassing using hydrodynamic action

1 – separating strip; 2 – degassing borehole in a seam; 3 – degassing borehole in host rock; 4 – air governor; 5 – gas pipeline; 6 – cages; a – initial spacing of main roof breaks; b – spacing of main roof breaks; ——— direction of intake air; - - - - direction of return ventilation air

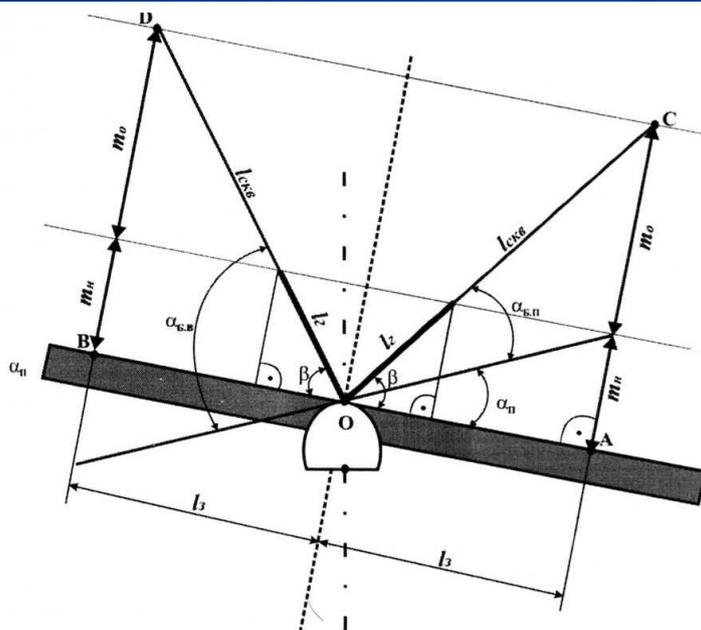


Рис. 5. Расчетная схема определения параметров дегазационных скважин

Fig. 5. Calculation pattern for degassing borehole parameter determination

На базе анализа условий отработки газонасыщенных угольных пластов и проведенных исследований разработана перспективная технологическая схема дегазации пластов гидродинамическим воздействием. Технологическая схема предусматривает бурение из подготовительной выработки или специальных ниш технологических скважин по углу и дегазационных – по породе (рис. 4).

Бурение скважин в угольный пласт осуществляется через породы почвы. Длина породной части скважины должна составлять не менее 10 м. Параметры заложения технологической скважины определяются графически с учетом мощности и угла падения пласта, расстояния до максимума опорного давления и расстояния от подошвы выработки до устья скважины. Бурение дегазационных скважин производится по породам кровли пласта. Длина герметизации дегазационной скважины определяется ее длиной в породах непосредственной кровли, но не меньше 6 м. Параметры бурения дегазационных скважин определяются расчетным способом (рис. 5).

Угол между кровлей пласта и дегазационной скважиной

$$\beta = \arctg \frac{m_o + m_n}{l_3}, \text{ град.}$$

где m_o – мощность основной кровли, м; m_n – мощность непосредственной кровли, м; l_3 – расстояние до зоны максимума опорного давления, м.

Длина скважины:

$$l_{\text{скв}} = \sqrt{(m_o + m_n)^2 + l_3^2}, \text{ м.}$$

Угол дегазационной скважины по восстанию:

$$\alpha_{\text{св.в}} = \beta + \alpha_n = \arctg \frac{m_o + m_n}{l_3} + \alpha_n, \text{ град.}$$

где α_n – угол падения пласта, град.

Угол дегазационной скважины по падению:

$$\alpha_{\text{св.п}} = \beta - \alpha_n = \arctg \frac{m_o + m_n}{l_3} - \alpha_n, \text{ град.}$$

Глубина герметизации дегазационной скважины:

$$l_r = \frac{l_n}{\sin \beta}, \text{ м.}$$

После обсадки скважины металлическими трубами диаметром 102–114 мм и ее герметизации устанавливается на крепежный фланец обсадной трубы модифицированная задвижка ЗВД200/4 с механизмом управления и дистанционным пультом. Гидродинамическое воздействие осуществляется с параметрами, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Параметры способа интенсификации дегазации пологого угольного пласта
Parameters of the method for flat-lying coal seam degassing intensification

Наименование	Количество
Диаметр дегазационной скважины, мм	≥ 76
Диаметр части скважины для герметизации, мм	≥ 150
Длина дегазационной скважины по углю, м	≥ 20
Длина дегазационной скважины по породе, м	Расчетная
Глубина герметизации дегазационной скважины, м	≥ 6
Давление подачи рабочей жидкости, МПа	≤ 5
Остаточное давление в скважине после сброса, МПа	0
Объем сброса жидкости в конце каждого цикла, м ³	0,3–1,0
Коэффициент извлечения угля	$\geq 0,01$
Коэффициент дегазации	0,3–0,8

При закрытой задвижке ЗВД200/4 основным насосом через скважину в пласт подается вода до создания рабочего давления, затем задвижка открывается и производится сброс давления до величины, обуславливающей необходимую разницу давлений в угольном пласте. В результате из скважины выбрасывается вода вместе с разрушенным углем, свободным и десорбированным газом. Повторение циклов создания давления и его сброса производят до прекращения выхода из скважины частиц разрушенного угля или при достижении необходимого количества угля и газа, извлекаемых из зоны обработки. После окончания ГДВ на крепежный фланец обсадной трубы устанавливается фланец гофрированного газоотводящего шланга дегазационной системы.

Выводы

По результатам проведенных шахтных исследований способа дегазации газонасыщенных пологих угольных пластов гидродинамическим воздействием установлено следующее.

1. Применяемые в настоящее время нормативные способы дегазации газонасыщенных угольных пластов на больших глубинах зачастую не обеспечивают необходимую для ритмичной работы очистных забоев эффективность дегазации 50 % и выше, что снижает темпы ведения очистных и подготовительных работ.

2. Впервые установлено влияние гидродинамического воздействия на степень дегазации газонасыщенных пластов. Под дейст-

вием давления снижается содержание в угле активных, способных к взаимодействию с метаном парамагнитных центров, в результате чего снижается граничная сорбционная способность угольного вещества. Для оценки длительности сорбционного и десорбционного взаимодействия в системе «уголь–газ» предлагается использовать показатель времени протекания переходного процесса T_N , характеризующий нарушенность вещества.

3. Установлен синхронный характер изменения геомеханических и газодинамических процессов в угольном пласте после проведения гидродинамического воздействия. При этом положение максимумов прироста концентрации метана в воздушной струе выработки запаздывает по времени на 1–5 суток от максимумов акустической эмиссии.

4. На интенсивное газовыделение из подземных скважин после ГДВ влияет временное опорное давление приближающейся лавы. При приближении лавы дебит скважин вначале снижается, а затем резко возрастает, достигая максимума на расстоянии 25–15 м до скважин. В дальнейшем при подработке скважин выход газа снижается из-за выделения метана непосредственно в лаву и выработанное пространство.

5. Разработаны технология и способ интенсификации дегазации пологих газонасыщенных угольных пластов, определены параметры способа, позволяющие достичь эффективности дегазации на обработанных участках 30–70 %.

Библиографический список

1. Булат А. Ф. Проблемы горного дела, энергетики и экологии / А. Ф. Булат, М. С. Четверик; ИГТМ НАН Украины. Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Днепропетровск, 2013. № 110. С. 3–14.
2. Ильяшов М. А. Влияние производительности и скорости подвигания забоя на газовый баланс выемочного участка. Горный журнал. 2010. № 7. С. 100–102.
3. Горные работы в сложных условиях на выбросоопасных пластах. С. П. Минеев, А. А. Рубинский, О. В. Витушко, А. Г. Радченко. Донецк: Східний видавничий дім, 2010. 603 с.
4. Забурдяев В. С. Способы интенсификации газоотдачи неразгруженных пластов в подземных условиях. В. С. Забурдяев, Г. С. Забурдяев. Современные проблемы шахтного метана: Сб. науч. тр. М.: МГТУ, 1999. С. 106–117.
5. Звягильский Е.Л. Управление метановыделением на выемочных участках угольных шахт / Е. Л. Звягильский, Б. В. Бокий, О. И. Касимов. Донецк: Ноулидж, 2013. 124 с.
6. Чурадзе М. В. Способы гидравлического воздействия на угольные пласты для борьбы с внезапными выбросами угля и газа. ГИАБ. 2000. №7. С. 219–222.
7. Софийский К. К. Безопасность и эффективность метаноугольных шахт: [монография]. К. К. Софийский, Р. К. Стасевич, Б. В. Бокий, А. В. Шейко, В. И. Гаврилов, О. В. Московский, Е. Е. Дудля. К.: ФЛП Халиков Р. Х., 2017. 308 с.
8. Правила ведення гірничих робіт на пластах, схильних до газодинамічних явищ: СОУ 10.1.0017.4088.011-2005. Чинний від 2005-12-30. К.: Мінвуглепром України, 2005. 222 с.
9. Софійський К. К. Концептуальна сутність способу комплексної профілактичної обробки напружених газонасичених та викидонебезпечних вугільних пластів гідродинамічною дією / К.К. Софійський, С.Г. Барадулін, А.В. Аксенов. Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. ИГТМ НАН Украины. Днепропетровск, 2001. Вып. 27. С. 144–150.
10. Айруни А. Т. Экономическая эффективность борьбы с рудничными газами методами вентиляции и дегазации. А. Т. Айруни, Ю. Н. Бессонов. – М., 1971. – 55 с.
11. Лидин Г.Д. Борьба со скоплениями метана в угольных шахтах. Г. Д. Лидин, А. Т. Айруни, Ф. С. Клебанов [и др.]. М.: Госгортехиздат, 1961. 140 с.
12. Забурдяев В. С. Дегазация пологих угольных пластов. Уголь. 1978. № 5. С. 57–60.
13. Дегазація вугільних шахт. Вимоги до способів та схеми дегазації. К.: Мінпаливенерго України, 2004. 161 с.
14. Скипочка С. И. Механизмы генерации метана в угольных шахтах. С. И. Скипочка, Т. А. Паламарчук. Уголь Украины. 2013. № 2. С. 30–34.
15. Саранчук В. И. Надмолекулярная организация, структура и свойства угля. В. И. Саранчук, А. Т. Айруни, К. Е. Ковалев. К.: Наук. думка, 1988. 192 с.
16. Гончаренко В. А. Автоматизация процесса обработки и расчета сорбционных и структурных свойств угля, определяемых методом ЭПР. В. А. Гончаренко, А. В. Бурчак, В. В. Котляров. Науковий вісник НГАУ: Зб. наук. пр. НГАУ. Дніпропетровськ, 2001. № 4. С. 69–71.
17. Бурчак А. В. Исследование системы «уголь–газ» и разработка способов оценки метаморфизма и нарушенности углей методом ЭПР: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.11. А. В. Бурчак. Днепропетровск: НГУ, 1994. 14 с.
18. Лукинов В. В. Исследование структурных особенностей выбросоопасных углей методом ЭПР. В. В. Лукинов, А. В. Бурчак; ИГТМ НАН Украины. Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. Днепропетровск, 2005. Вып. 57. С. 35–40.
19. Кузнецов С. В. К вопросу о кинетике десорбции при газодинамических явлениях в угольных шахтах. С.В. Кузнецов, В.А. Бовин. ФТПРПИ. 1980. № 1. С. 58–65.
20. Софийский К. К. Способы интенсификации дегазации угольных пластов и предотвращения выбросов угля и газа: монография. К. К. Софийский, Д. М. Житленок, В.И. Гаврилов [и др.]. Донецк: ТОВ «Східний видавничий дім», 2014. 460 с.
21. Софийский К. К. Гидродинамические способы воздействия на напряженные газонасыщенные угольные пласты: монография. К. К. Софийский, В. И. Гаврилов, Д. М. Житленок [и др.]. Донецк: ТОВ «Східний видавничий дім», 2015. 364 с.
22. Гаврилов В. И. Интенсификация газовыделения из низкопроницаемого угольного пласта гидродинамическим воздействием. В. И. Гаврилов, К. К. Софийский. Горный журнал. 2019. № 2. С. 83–87.
23. Топчій С. Є. Обґрунтування параметрів способу оперативного контролю та управління станом гірничого масиву із застосуванням звукоуловлючої апаратури : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.02. С. Є. Топчій. Донецьк: ІФГП НАН України, 2007. 20 с.

24. Черняк И. Л. Управление состоянием массива горных пород / И.Л. Черняк, С.А. Ярунин. М.: Недра, 1995. 395 с.

25. КД 12.01.05.101-99. Прогноз динамических проявлений горного давления по активности акустической эмиссии: методика. Горловка: ДонНИИ, 1999. 21 с.

References

1. Bulat A. F. Problems of mining, energy and ecology / A.F. Bulat, M.S. Chetverik; IGTM NAS of Ukraine. Geotechnical Mechanics: Proceedings (collection of scientific papers), Dnepropetrovsk, 2013, No. 110, pp. 3-14 (in Russ.).

2. Ilyashov M. A. The influence of productivity and the advance rate on gas balance of extraction district. Mining Journal, 2010, No. 7, pp. 100–102 (in Russ.).

3. Mineev S. P., Rubinsky A. A., Vitushko O. V., Radchenko A. G. Outburst-dangerous seam mining operations in heavy conditions. Donetsk: Skhidni vidavnychy dim (East Publishing House), 2010, 603 p. (in Russ.).

4. Ziburdaev V. S. Methods of gas recovery intensification in unrelieved seams in underground conditions. V. S. Ziburdaev, G. S. Ziburdaev. Current issues of mine methane: Proceedings, Moscow, MGGU, 1999, pp. 106–117 (in Russ.).

5. Zvyagilsky E. L. Methane release control in coal mine mining districts / E.L. Zvyagilsky, B.V. Boki, O.I. Kasimov. Donetsk: Knowledge Publ., 2013, 124 p. (in Russ.).

6. Churadze M. V. Methods of hydraulic action on coal seams to prevent sudden coal-and-gas outbursts. GIAB, 2000, No. 7, pp. 219–222 (in Russ.).

7. Sofiysky K. K. Safety and effectiveness of methane-coal mines [monography] (*Bezopasnost' i effektivnost' metanougol'nykh shakht*). K. K. Sofiysky, R. K. Stasevich, B. V. Boki, A. V. Sheiko, V. I. Gavrilov, O. V. Moscow, E.E. Dudlya. Kiev: FLP Khalikov R. Kh., 2017, 308 p. (in Russ.).

8. The rules for mining of seams with gas dynamic activity manifestations: SOU 10.1.0017.4088.011-2005. Valid from 2005-12-30. Kiev: Minvugleprom of Ukraine, 2005, 222 p. (in Ukrainian).

9. Sofiysky K.K. Conceptual basis of method for comprehensive preventive hydrodynamic treatment of gas-saturated and outburst-dangerous seams with hydrodynamic design / K. K. Sofiysky, S. G. Baradulin, A. V. Aksenov. Geotechnical Mechanics: Proceedings of IGTM NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, 2001, Issue 27, pp. 144-150 (in Ukrainian).

10. Airuni A. T. Economic effectiveness of mine gas control by ventilation and degassing methods (*Ekonomicheskaya effektivnost' bor'by s rudnichnymi gazami metodami ventilyatsii i degazatsii*). A. T. Airuni, Yu. N. Bessonov, Moscow, 1971, 55 p. (in Russ.).

11. Lidin G. D. Methane accumulation control in coal mines (*Bor'ba so skopleniyami metana v ugol'nykh shakhtakh*). G. D. Lidin, A. T. Airuni, F. S. Klebanov et al. Moscow: Gosgortekhnizdat Publ., 1961, 140 p. (in Russ.).

12. Ziburdaev V. S. Degassing flat coal seams (*Degazatsiya pologikh ugol'nykh plastov*). Coal (*Ugol'*), 1978, No. 5, pp. 57-60 (in Russ.).

13. Degassing of coal mines. Requirements for methods and arrangement for degassing. K.: Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, 2004, 116 p. (in Ukrainian).

14. Skipochnka S. I. Mechanisms of methane generation in coal mines. S.I. Skipochnka, T.A. Palamarchuk. Coal of Ukraine (*Ugol' Ukrainy*), 2013, No. 2, pp. 30–34 (in Russ.).

15. Saranchuk V.I. Supramolecular organization, structure and properties of coal. (*Nadmolekulyarnaya organizatsiya, struktura i svoystva uglya*) Saranchuk V.I., Airuni A.T., Kovalev K.E. K.: Naukova Dumka Publ., 1988, 192 p. (in Russ.).

16. Goncharenko V. A. Automation of processing and calculation of sorption and structural properties of coal determined by EPR method. V. A. Goncharenko, A. V. Burchak, V. V. Kotlyarov. NSAU Scientific Newsletter, Dnipropetrovsk, 2001, No. 4, pp. 69–71 (in Russ.).

17. Burchak A. V. The study of coal-gas system and development of methods for coal metamorphism and broken condition assessing using EPR method (*Issledovanie sistemy «ugol'-gaz» i razrabotka sposobov otsenki metamorfizma i narushennosti ugley metodom EPR*): Extended abstract of Cand. Sci. Dissertation in engineering science, 05.15.2011, A.V. Burchak, Dnepropetrovsk, NSU, 1994, 14 p. (in Russ.).

18. Lukinov V. V. The study of structural features of outburst-hazardous coal by EPR method (*Issledovanie strukturnykh osobennostey vybrosoopasnykh ugley metodom EPR*). V.V. Lukinov, A.V. Burchak, IGTM NAS of Ukraine. Geotechnical Mechanics Proceedings, Dnepropetrovsk, 2005, Issue 57, pp. 35–40 (in Russ.).

19. Kuznetsov S. V. On the kinetics of desorption in gas-dynamic phenomena in coal mines. S.V. Kuznetsov, V.A. Bovin, FTPI, 1980, No. 1, pp. 58–65 (in Russ.).

20. Sofiysky K. K. Methods for intensifying coal seam degassing and preventing coal-and-gas outbursts (*Sposoby intensivifikatsii degazatsii ugol'nykh plastov i predotvrashcheniya vybrosov uglya i gaza*) (monography). K.K. Sofiysky, D.M. Zhitlenok, V.I. Gavrilov et al. Donetsk: LLP Skhidniy Vidavniy Dim Publ., 2014, 460 p. (in Russ.).
21. Sofiysky K. K. Hydrodynamic methods of influencing stressed gas-saturated coal seams (monography) (*Gidrodinamicheskie sposoby vozdeystviya na napryazhennye gazonasyshchennye ugol'nye plasty*) K. K. Sofiysky, V. I. Gavrilov, D. M. Zhitlenok et al. Donetsk: LLP Skhidniy Vidavniy Dim Publ., 2015, 364 p. (in Russ.).
22. Gavrilov V. I. Intensification of gas release from low permeable coal seam by hydrodynamic action. Gavrilov V.I., Sofiysky K.K. Mining Journal (Gornyy Zhurnal), 2019, No 2, pp. 83–87 (in Russ.).
23. Topchy S. E. Substantiation of the parameters of the method for operational control of rock mass conditions using acoustic equipment (*Obgruntuvannya parametriv sposobu operativnogo kontrolyu ta upravlinnya stanom girnichogo massivu iz zastosovanniam zvukoulovlyuchoi aparaturi*): Extended abstract of Cand. Sci. Dissertation in engineering science, 05.15.02, S. E. Topchy, Donetsk: IFGP NAS of Ukraine, 2007, 20 p. (in Ukrainian).
24. Chernyak I. L. Rock mass state control (*Upravlenie sostoyaniem massiva gornyx porod*) / I. L. Chernyak, S. A. Yarunin. Moscow: Nedra Publ., 1995.395 p. (in Russ.).
25. KD 12.01.05.101-99. Forecast of dynamic manifestations of rock pressure based on acoustic emission activity: technique. Horlivka: DonNII, 1999, 21 p. (in Russ.).

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-172-180

**Основные факторы неблагоприятного воздействия на окружающую среду
деятельности калийного производства и способы ее защиты**

Высоцкая Н. А., Пискун Е. В.

Закрытое акционерное общество «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», Солигорск, Минская область, Республика Беларусь, ✉onti@sipr.by

Аннотация: В настоящее время неблагоприятным фактором для окружающей среды в Солигорском горно-промышленном районе является влияние подземных горных работ на рельеф и ландшафтную обстановку. Отмечено, что подтопление и заболачивание на подрабатываемой территории шахтных полей калийных рудников связано со специфическими природными условиями района. Известно, что глинисто-солевые шламы складировать в шламохранилищах. С целью предотвращения фильтрации рассолов и диффузионного проникновения солей в подстилающие грунты и грунтовые воды и недопущения тем самым засоления геологической среды в районах размещения солеотвалов и на откосах ограждающих дамб устраивается противофильтрационный экран. Отмечено, что в последние годы на рудоуправлениях ОАО «Беларуськалий» широко используется технология высотного складирования твердых отходов, что позволяет сократить площади, занимаемые под солеотвалы. В целях предотвращения и ликвидации избыточных рассолов в ОАО «Беларуськалий» внедрен способ биологической рекультивации отработанных шламохранилищ, что предусматривает создание растительного покрова на поверхности почвенно-грунтового слоя и условий для его самовосстановления. Определено, что есть пять степеней загрязнения подземных вод Солигорского промрайона: низкая, средняя, периодически высокая, высокая, катастрофически высокая. Отмечено, что на растительный и животный мир в районе деятельности калийных предприятий отрицательное воздействие оказывают в основном следующие факторы: изъятие земель под промплощадки, солеотвалы и шламохранилища и, как следствие, сокращение площади растительного покрова; затопление, подтопление и заболачивание земель вследствие оседания земной поверхности над отработанными горными выработками; засоление избыточными рассолами прилегающих к предприятию территорий; влияние промышленных пылегазовыбросов. Одним из средств борьбы с засолениями почвы является создание лесозащитных полос.

Ключевые слова: шламохранилище, горнопромышленный район, грунтовые воды, избыточный рассол, степень загрязнения, подземные воды, глинисто-солевой экран.

Для цитирования: Высоцкая Н. А., Пискун Е. В. Основные факторы неблагоприятного воздействия на окружающую среду деятельности калийного производства и способы ее защиты. *Горные науки и технологии*. 2019;4(3):172-180. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-172-180.

**The Main Factors of Adverse Environmental Impact
of Potash Production and Methods of Environmental Protection**

N. A. Vysotskaya, E. V. Piskun

Closed Joint-Stock Company Soligorsk Institute for Resource Saving Problems with Pilot Production,
Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus, ✉onti@sipr.by

Abstract: Currently, an adverse environmental factor in the Soligorsk mining district is the effect of underground mining on the terrain and landscape. The remarkable thing is that flooding and waterlogging in the undermined territory of the potash mine fields is connected with specific natural conditions of the district. Clay-salt tailings are known to be stored in salt tailings piles. To prevent the filtration of brines and diffusive penetration of salts into underlying soil and groundwater and thereby prevent salinization of geological environment, in the areas where salt tailings piles are located and on the slopes of bund walls, an impervious screen is arranged. It was noted that in recent years, Belaruskali OJSC's ore departments have been widely using high-altitude solid waste piling method, which reduces the area occupied by salt tailings piles. To prevent and eliminate excess brines, Belaruskali introduced a method for biological reclamation of spent salt tailings piles, which provides for creation of vegetation on the soil layer surface and the conditions for its self-regeneration. Five degrees of groundwater pollution in the



Soligorsk industrial district were distinguished: low, medium, periodically high, high, and catastrophically high. It was found that the following factors have negative impact on flora and fauna in the district where potash enterprises operate: land acquisition for industrial sites, salt tailings piles and TSF and, as a result, reduction in the area of vegetation cover; flooding and waterlogging of lands due to subsidence of the earth's surface above the worked-out mine workings; salinization of territories adjacent to the enterprise by excess brines; impact of industrial dust and gas emission. One of salinization control measures is creation of forest shelter belts.

Keywords: salt tailings pile, mining district, groundwater, excess brine, degree of pollution, clay-salt barrier.

For citation: Vysotskaya N. A., Piskun E. V. The main factors of adverse environmental impact of potash production and methods of environmental protection. *Mining Science and Technology*. 2019;4(3):172-180 (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-172-180.

Введение

В настоящее время Беларусь входит в первую пятерку калийпроизводящих стран мира. Темпы горнопромышленного освоения Старобинского месторождения калийных солей негативно сказались на естественной природной обстановке этого региона. Подземная добыча силвинитовой руды на Старобинском месторождении ведется механизированным способом на втором и третьем (частично на первом) промышленных горизонтах на глубинах 400...500 м и 600...1000 м соответственно.

Наличие больших мощностей калийного производства в Солигорском районе с его огромными объемами отходов обуславливает необходимость детального исследования динамики качества грунтовых и межпластовых вод. В зависимости от концентрации веществ техногенного происхождения и санитарных норм, принятых для питьевых вод, на территории района выделены участки с низкой, средней, периодически высокой, высокой и катастрофически высокой степенью загрязнения грунтовых вод [1].

Оседание земной поверхности и изменение уровня режима грунтовых вод. Весьма неблагоприятным фактором для окружающей среды в Солигорском горнопромышленном районе является влияние подземных горных работ на рельеф и ландшафтную обстановку района вследствие оседания и деформации земной поверхности.

Оседание поверхности земли над отработанными горными выработками, начинаю-

щиеся через 1...2 года после выемки полезного ископаемого, достигает конечной величины 3,5...4,5 м при отработке двух калийных горизонтов.

Интенсивность процесса сдвижения земной поверхности зависит от применяемых систем разработки, глубины ведения горных работ и порядка отработки пластов. Подтопление и заболачивание на подрабатываемой территории шахтных полей калийных рудников связано также со специфичными природными условиями района [2, 3].

Зона затопления образуется на наиболее пониженных в рельефе участках [4, 5]. В пределах месторождения к ней относятся прибрежная зона водохранилища, долины рек Рутки и Сивельги и южная часть шахтного поля 4-го рудоуправления (РУ). Затопление земель здесь возможно главным образом грунтовыми и речными водами.

К **зоне заболачивания** относится часть подрабатываемой территории с переходными формами рельефа, сложенная водопроницаемыми отложениями и характеризующаяся глубиной залегания грунтовых вод, превышающей амплитуду оседания на 0,1...0,2 м [6]. По сравнению с первой вредное влияние горных разработок здесь проявляется в меньшей степени и заключается только в заболачивании местности.

Зона подтопления охватывает более возвышенные участки, в пределах которых глубина залегания уровня грунтовых вод колеблется в пределах 1,0...2,0 м выше амплитуды оседания. Вредное влияние горных раз-

работок в ней проявляется еще в меньшей степени и заключается лишь в подтоплении фундаментов и подвальных помещений зданий и сооружений.

Шламохранилища. На калийных предприятиях существует шламовое хозяйство – комплекс сооружений и оборудования, предназначенный для гидравлического транспортирования шламовых отходов к месту их складирования и хранения, гидравлической укладки шламовых отходов и обратного водоснабжения обогатительной фабрики. В комплекс сооружений входят и шламохранилища [7].

Глинисто-солевые шламы складировать в шламохранилищах. С целью предотвращения фильтрации рассолов и диффузионного проникновения солей в подстилающие грунты и грунтовые воды и недопущение тем самым засоления геологической среды в районах размещения солеотвалов и на откосах ограждающих дамб устраивается противофильтрационный экран [8].

Наибольшее распространение при сооружении шламохранилищ в ОАО «Беларуськалий» получило применение двухслой-

ного противофильтрационного экрана из полиэтиленовой пленки, стабилизированной сажей, с защитным слоем из местного сыпучего (суглинистого) грунта толщиной 0,5 м (0,8 м для дамб) с закладкой днища шламохранилища на 1,0 м и более выше зеркала грунтовых вод, определенного с учетом максимальной амплитуды оседания земной поверхности на конец процесса сдвижения. При этом пленка укладывается непосредственно на спланированную и укатанную поверхность основания шламохранилища и верховые откосы ограждающих дамб, сложенных естественными песчаными или супесчаными грунтами. Отметка заложения противофильтрационного экрана в основание шламохранилища по отношению к уровню грунтовых вод нормативами не регламентируется. В каждом конкретном случае она определяется, исходя из геолого-гидрогеологических условий участка строительства и инженерно-геологических свойств слагающих его пород, но, как правило, отметка верха пленочного экрана не менее чем 1,0 м выше зеркала грунтовых вод (рис. 1) [9].

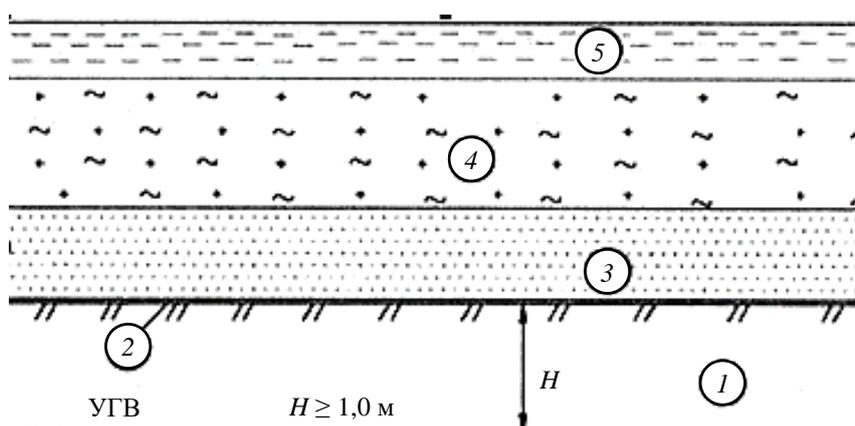


Рис. 1. Противофильтрационный экран, устраиваемый в основании шламохранилищ на ОАО «Беларуськалий»:

1 – подстилающие уплотненные (укатанные) супесчаные (суглинистые) грунты; 2 – стабилизированная сажей полиэтиленовая пленка; 3 – защитный слой из местного супесчаного (суглинистого) грунта толщиной 0,5 м; 4 – шламовые грунты (твердая фаза, выпавшая в осадок из глинисто-солевых шламов); 5 – осветленные рассолы

Fig. 1. Impervious screen arranged in the base of salt tailings piles at JSC Belaruskali:

1 – underlying compacted (rolled) sandy loamy soils; 2 – polyethylene film stabilized with black; 3 – protective layer of local sandy loam soil 0.5 m thick; 4 – sludge soils (solid phase precipitated from clay-salt sludge); 5 – clarified brines

Загрязнение атмосферного воздуха.

Хранящиеся на поверхности земли солевые отходы подвергаются агрессивному выщелачивающему воздействию атмосферных осадков, выпадающих на незащищенную поверхность солеотвалов и шламохранилищ с образованием избыточных рассолов на пределе насыщения солями с минерализацией до 340...350 г/л. Годовое увеличение их объема связано с увеличением площадей складирования отходов [10]. Эти обстоятельства вынуждают проводить мероприятия по уменьшению площадей изымаемых из сельскохозяйственного оборота земель для складирования солеотходов. При их сооружении в основании готовят ложе с применением плечных экранов.

В последние годы на рудоуправлениях ОАО «Беларуськалий» широко используется технология высотного складирования твердых отходов, что позволяет сократить площади, занимаемые под солеотвалы.

В целях предотвращения появления и ликвидации избыточных рассолов в ОАО «Беларуськалий» внедрен способ биологической рекультивации отработанных шламохранилищ, что предусматривает создание растительного покрова на поверхности почвенно-грунтового слоя и условий для его самовосстановления.

Биологическая рекультивация отработанных шламохранилищ калийных предприятий осуществляется в два этапа [11]:

1) горнотехнический – подготовка поверхностей шламовых грунтов с предварительным удалением рассолов, нанесение на них противодиффузионного и противодиффузионного экрана и почвенно-грунтового слоя;

2) собственно биологический – агротехнические приемы подготовки почвы, посев и выращивание кормовых трав.

Горнотехническому этапу предшествует изучение вещественного и механического состава шламовых грунтов рекультивируемого

шламохранилища, а также их инженерно-геологических свойств.

Горнотехнический этап рекультивации включает следующие рабочие процессы [12, 13]:

1) удаление избыточных рассолов с поверхности шламохранилища для естественного осушения поверхности шламовых грунтов;

2) подготовка поверхности шламовых грунтов для укладки полиэтиленового покрытия (планировка, создание уклонов и др.);

3) устройство полиэтиленового покрытия (экрана) на поверхности шламовых грунтов;

4) нанесение поверх полиэтиленового покрытия грунтового слоя;

5) нанесение почвенного слоя на поверхность грунтового слоя;

6) контроль качества и прием выполненных работ.

Биологическая рекультивация является завершающим этапом восстановления нарушенных шламохранилищами земель и включает комплекс агротехнических приемов, осуществляемых после проведения горнотехнического этапа рекультивации [14, 15].

Калийные предприятия ОАО «Беларуськалий» имеют 637 источников пылегазовыбросов в атмосферу, из них 556 организованных. В сушильных отделениях обогатительных фабрик и цехах грануляции хлористого калия образующиеся пылегазовыбросы проходят сухую и мокрую стадии очистки. Все рудоуправления и котельные не превышают установленные нормативы на выброс вредных веществ в атмосферу (предельно допустимые выбросы, ПДВ). Общий объем выбрасываемых в атмосферу газообразных веществ составляет $\approx 25,0$ тыс. т в год [16]. Радиус выпадения солевой пыли от источника выброса (промплощадки рудоуправлений) составляет в среднем 2 км, а максимальное ее количество – в радиусе 0,5...1,0 км. Общая площадь земель, подверженных засолению оседающей солевой пылью, вокруг рудоуправлений составила около 1 000 га.

Степень загрязнения подземных вод Солигорского горнопромышленного района. Низкая степень загрязнения установлена на участках, где хозяйственная деятельность сведена к минимуму, а уровень химической трансформации верхней части подземной гидросферы определяется лишь атмосферным трансграничным переносом загрязняющих веществ. К этим участкам относятся в основном лесные массивы в южной половине района, где химический состав и минерализация грунтовых вод практически соответствуют естественному фону или незначительно превышают его. Общая площадь этих участков составляет около 39 % от площади Солигорского района.

Средняя степень загрязнения грунтовых вод характеризуется повышенными концентрациями химических веществ, превышающими их естественный фон, но не достигающими предельно допустимой концентрации (ПДК) для питьевых вод. Участки с таким уровнем загрязнения расположены вдали от наиболее опасных источников загрязнения, где их влияние ослабевает. К ним отнесены сельскохозяйственные угодья, а также территории небольших деревень. Грунтовые воды пригодны для питьевых целей при улучшении отдельных показателей по железу, фтору, иногда марганцу. Пестициды в грунтовых водах на территории района не зафиксированы.

Периодически высокая степень загрязнения грунтовых вод установлена на территории 28 деревень, а также г. п. Старобин и Красная Слобода. Для этих участков характерно периодическое превышение ПДК по одному или нескольким показателям. На участках периодически высокого загрязнения в грунтовых водах за последние 20...30 лет выросли концентрации соединений азота (нитраты, аммоний), хлоридов, кальция, магния, нередко сульфатов. Общая площадь периодически высокого загрязнения составляет 2,1 % от общей площади района.

Высокой степени загрязнения грунтовых вод соответствует постоянное и устойчивое превышение ПДК по одному или нескольким показателям.

Катастрофически высокая степень загрязнения пресных (как грунтовых, так и межпластовых) вод установлена на участках солеотвалов и шламохранилищ калийных комбинатов. Здесь не только увеличивается концентрация загрязняющих веществ в 500...1 000 раз и более, но и возрастает минерализация воды (с 0,2 до 156,0 г/дм³). Полностью изменяется тип воды: от гидрокарбонатных магниевых-кальциевых вод до крепких хлоридно-натриевых рассолов.

Пресные межпластовые воды также подверглись поверхностному загрязнению. Но в отличие от грунтовых вод, степень загрязнения их на порядок ниже, а распространение носит локальный характер. Максимальные концентрации загрязняющих веществ в межпластовых водах наблюдаются в зоне с высоким загрязнением грунтовых вод, а также вблизи животноводческих объектов [17].

Загрязнение водных ресурсов. Из всех проблем в области охраны окружающей среды вопросы предотвращения регионального распространения ореолов загрязненных подземных вод в водоносных горизонтах являются до настоящего времени во всех странах наиболее трудноразрешимыми в техническом и экономическом отношении [18, 19].

Насыщенные рассолы, проникая в водоносный горизонт, распространяются в нем вертикально вниз под влиянием гравитационных сил. При этом скорость их опускания превосходит в десятки раз скорость подземного потока в первом от поверхности земли водоносном горизонте, а суглинистые и супесчано-глинистые моренные прослои в рыхлой песчано-глинистой водонасыщенной толще четвертичных и неоген-палеогеновых отложений не являются преградой (экраном) для опускания рассолов, а лишь замедляют этот процесс. Гидромеханические и геофизи-

ческие исследования выявили, что засоление подземных вод происходит на участках под солеотвалами 1, 2, 3 и 4-го РУ, а также участках шламохранилищ этих рудоуправлений. Глинисто-солевой экран оказался неэффективным в условиях солевых отходов калийных производств.

Подземные воды под солеотвалами и шламохранилищами засолены на всю глубину верхнего водоносного комплекса до кровли регионального водоупора – верхнедевонской водоупорной надсолевой глинисто-мергелистой толщи. Сами промплощадки рудоуправлений также оказались источниками загрязнения подземных вод.

В результате засоления подземных вод вышли из строя большинство артезианских скважин водозаборов на 1, 2 и 3-м рудоуправлениях. Исследования по оценке пригодности вод Солигорского и Любанского водохранилищ для хозяйственно-питьевого водоснабжения выявили, что основными загрязняющими поверхностные воды веществами являются органические вещества и железо.

Вода Солигорского водохранилища характеризуется нестабильным качественным составом из-за попадания загрязненных вод через р. Рутку, ливневых вод с промплощадок 1 и 3-го рудоуправлений и территории г. Солигорска и сбрасывания мелиоративных вод из мелиоративных систем.

Результаты гидрохимических наблюдений показали, что качество воды в Солигорском, Любанском и Краснослободском водохранилищах не удовлетворяет требованиям, предъявляемым к водоемам хозяйственно-питьевого назначения, в основном по содержанию органических веществ, нефтепродуктов и бактериологическим показателям. Наблюдается тенденция роста концентрации хлоридов и сульфатов.

Влияние на растительный мир. На растительный и животный мир в районе деятельности калийных предприятий отрица-

тельное воздействие оказывается в основном следующими факторами:

- изъятие земель под промплощадки, солеотвалы и шламохранилища и, как следствие, сокращение площади растительного покрова;

- затопление, подтопление и заболачивание земель вследствие оседания земной поверхности над отработанными горными выработками;

- засоление избыточными рассолами прилегающих к предприятию территорий;

- влияние промышленных пылегазов выбросов.

Общая площадь лесов, находящихся в зоне отработки шахтных полей, составляет около 2 000 тыс. га. Леса расположены в южной части шахтных полей 1 и 4-го РУ.

Наиболее существенное затопление наблюдается в Любанском лесничестве – в зоне оседания общей площадью 350 га. Эти лесные земли нуждаются в защите от затопления.

Солеотвалы и шламохранилища отнимают жизненное пространство по мере их расширения. Несмотря на нахождение их на открытой поверхности, десятилетиями не обнаруживается самозарастания солеотвалов какой-либо растительностью.

Одним из средств борьбы с засолением почвы является создание лесозащитных полос. Лесозащитные насаждения вокруг солеотвалов и в санитарно-защитных зонах снизят прежде всего рассеивание солевых отходов на прилегающие сельскохозяйственные угодья, являясь форпостом перед господствующими в регионе ветрами [20, 21].

Заключение

Ни одна отрасль народного хозяйства Республики Беларусь не оказывает столь значительного влияния на окружающую среду, как горно-химическое калийное производство, развивающееся на базе Старобинского месторождения калийных солей. Его воздействию подвергаются все элементы биосферы:

ее минеральная основа – геологическая среда с подземными водными ресурсами, земельные угодья, поверхностные водные ресурсы, воздушный бассейн и растительный мир.

ОАО «Беларуськалий» ежегодно выделяет значительные средства на осуществление природоохранных мероприятий для предотвращения отрицательного влияния калийного производства на окружающую среду. Вместе с тем эти усилия направлены в основном на ликвидацию последствий и не решают главных вопросов предотвращения складывающейся в районе Солигорска экологической обстановки.

Решение проблемы охраны природы в Солигорском горнопромышленном регионе требует комплексного подхода и совместных усилий многих научных и производственных организаций министерств и ведомств Республики Беларусь.

Таким образом, существует ряд проблем, которые необходимо решить как на общегосударственном, так и на местном уровне для реализации планов по обеспечению населения питьевой водой в рассматриваемом регионе.

Основной проблемой является проблема сохранения качества подземных вод эксплуатируемых водоносных горизонтов. Для этого требуется соблюдение режимов хозяйственной деятельности, регулирование любого нового строительства, проведение оценки воздействия на качество подземных вод существующих объектов или видов хозяйственной деятельности и принятие неотложных мер по предотвращению загрязнения подземных вод. В сельских населенных пунктах, использующих для питьевых нужд грунтовые воды путем создания шахтных колодцев, необходимо осуществить использование более глубоких водоносных горизонтов.

Библиографический список

1. Гледко Ю. А. Оценка степени защищенности подземных вод в районе добычи калийных солей. Геотектоника и минеральные ресурсы Беларуси: материалы Университетских чтений, посвященные 100-летию со дня рождения д-ра геол.-минерал. наук, проф. З. А. Горелика, Минск, 4–5 апреля 2008 г. Мн.: БГУ, 2008. С. 67–70.
2. Смычник А. Д., Богатов Б. А., Шемет С. Ф. Геоэкология калийного производства. Мн.: ЗАО «ЮНИПАК», 2005. 202 с.
3. Прушак В. Я., Высоцкая Н. А. Технология рекультивации отработанных шламохранилищ. XIV Международная конференция по открытой и подводной добыче полезных ископаемых. Варна, 3–7 июля 2017. Варна, 2017. С. 431–438.
4. Современные проблемы геологии: Университетские геологические чтения, посвященные 60-летию открытия Старобинского месторождения калийных солей, Минск, 3–4 апреля 2009 г. / Белорусский государственный университет, географический факультет; под общ. ред. Э. А. Высоцкого и др. Мн., 2009. 94 с.
5. Семенов А. В., Кузнецова Т. В., Степанов А. Л., Семенов В. М. Влияние азотного удобрения и растительных остатков на поведение метана в серой лесной почве. Агрехимия. 2004. № 4. С. 5–12.
6. Hay J. T. Controlled release nitrogen fertilizers. Manual of Fertilizer Proc. Fert. Sci. and Techn. Series. 1987. Vol. 5. Pp. 421–435.
7. Laiche A. J. jr. Slow-release fertilizer evaluation with container-grown plants. Mississippi state univ. Mississippi agr. and forestry experiment station. 1996. Vol. 21, № 2. 5 p.
8. Andersson A. Cadmium effekts from phosphorus fertilization in field experiments. A. Andersson, M. Nahlin. Swed. J. Agr. Res. 1981. Vol. 11. № 1.
9. Buswell A. M. Fundamentals of anaerobic treatment of organic wastes. 1957. 29 p.
10. Flaig W. Wirkung org. Bodensubstanzen und Ertragssicherung. Landbauforsch. W. Flaig, H. Sochtig. Volkenrode, 1999. № 23. Pp. 19–28.
11. Henze M., Kristensen G. H., Strube R. Determination of organic matter and nitrogen in wastewater. Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark. 1992.
12. Lie E., Welander T. Determination of volatile fatty acid potential of wastewater from different municipal treatment plants. Water Res., 1997, 31. Pp. 1269–1274.
13. Maier R. Pflanzen im Lebensraum Stadt. Die Störung der ökologischen Ordnung in den Kulturlandschaften. Veröff.d.Komm.f. Humanökologie, Österr. Akad. Wiss. 1992. Pp. 145–181.

14. McCarty P. L. Anaerobic waste treatment fundamentals. II. Environmental requirements and control. Public Works. 94, 1964. 123 p.
15. Кудеярова А. Ю. Хемосорбция фосфат-ионов и деструкция органо-минеральных сорбентов в кислых почвах. Почвоведение, 2010. № 6. С. 681–697.
16. Кудеярова А. Ю. Влияние орто- и пирофосфатов на трансформацию железогумусовых сорбентов и их способность связывать калий и цинк. Агрохимия. 2005. № 6. С. 66–75.
17. Кузнецова Т. В., Семенов А. В., Ходжаева А. К. и др. Накопление азота в микробной биомассе серой лесной почвы при разложении растительных остатков. Агрохимия, 2003. № 10. С. 3–12.
18. Никитишен В. И. Питание растений и удобрение агроэкосистем в условиях ополей Центральной России. М.: Наука, 2012. 485 с.
19. Семенов В. М., Тулина А. С. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем. Агрохимия, 2011. № 12. С. 53–63.
20. Семенов В. М., Когут Б. М., Лукин С. М. и др. Оценка обеспеченности почв активным органическим веществом по результатам длительных полевых опытов. Агрохимия, 2013. № 3. С. 19–31.
21. Семенов В. М., Кузнецова Т. В., Ходжаева А. К. и др. Почвенная эмиссия закиси азота: влияние природных и агрогенных факторов. Агрохимия, 2004. № 1. С. 30–39.

References

1. Gledko Yu. A. Assessment of the degree of groundwater protection in the area of potash salt extraction. Geotectonics and mineral resources of Belarus: Proceedings of the University Scientific Conference ad honorem the 100th anniversary of prof. Z. A. Gorelik, Minsk, April 4–5, 2008. Mn.: BSU, 2008, pp. 67–70 (in Russ.).
2. Smychnik A. D., Bogatov B. A., Shemet S. F. Geoecology of potash production. Mn.: ZAO "UNIPAK", 2005, 202 p. (in Russ.).
3. Prushak V. Ya., Vysotskaya N. A. Technology for reclamation of spent sludge storages. XIV International Conference on Opencast and Underwater Mining. Varna, July 3–7, 2017. Varna, 2017, pp. 431–438 (in Russ.).
4. Current problems of geology: Proceedings of the University Geological Scientific Conference for the 60th anniversary of the Starobinsky potassium salt deposit discovery, Minsk, April 3–4, 2009. Belarusian State University, Department of Geography; ed. E. A. Vysotsky et al. Mn., 2009, 94 p. (in Russ.).
5. Semenov A. V., Kuznetsova T. V., Stepanov A. L., Semenov V. M. Influence of nitrogen fertilizer and plant residues on the behavior of methane in grey forest soil. Agrochemistry, 2004, No. 4, pp. 5–12. (in Russ.).
6. Hay J. T. Controlled release nitrogen fertilizers. Manual of Fertilizer Proc. Fert. Sci. and Techn. Series. 1987, Vol. 5, pp. 421–435.
7. Laiche A. J. jr. Slow-release fertilizer evaluation with container-grown plants. Mississippi state univ. Mississippi agr. and forestry experiment station. 1996, Vol. 21, № 2. 5 p.
8. Andersson A. Cadmium effects from phosphorus fertilization in field experiments. A. Andersson, M. Hahlin. Swed. J. Agr. Res. 1981, Vol. 11. № 1.
9. Buswell A. M. Fundamentals of anaerobic treatment of organic wastes. 1957. 29 p.
10. Flaig W. Wirkung org. Bodensubstanzen und Ertragssicherung. Landbauforsch. W. Flaig, H. Sochtig. Volkenrode, 1999. № 23. Pp. 19–28.
11. Henze M., Kristensen G. H., Strube R. Determination of organic matter and nitrogen in wastewater. Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark. 1992.
12. Lie E., Welander T. Determination of volatile fatty acid potential of wastewater from different municipal treatment plants. Water Res., 1997, 31, pp. 1269–1274.
13. Maier R. Pflanzenim Lebensraum Stadt. Die Störung der ökologischen Ordnung in den Kulturlandschaften. Veröff. d. Komm. f. Humanökologie, Österr. Akad. Wiss. 1992, pp. 145–181.
14. McCarty P. L. Anaerobic waste treatment fundamentals. II. Environmental requirements and control. Public Works. 94, 1964. 123 p.
15. Kudeyarova A. Yu. Chemisorption of phosphate ions and destruction of organo-mineral sorbents in acidic soils. Soil Science, 2010, No. 6, pp. 681–697 (in Russ.).
16. Kudeyarova A. Yu. Effect of ortho- and pyrophosphates on the transformation of iron-humus sorbents and their ability to capture potassium and zinc. Agrochemistry, 2005, No. 6, pp. 66–75.
17. Kuznetsova T. V., Semenov A. V., Khodzhaeva A. K. et al. Nitrogen accumulation in the microbial biomass of grey forest soil during decomposition of plant residues. Agrochemistry, 2003, No. 10, pp. 3–12 (in Russ.).
18. Nikitishen V. I. Plant nutrition and application of fertilizers to agroecosystems in the conditions of high plains of Central Russia. Moscow: Nauka Publ., 2012, 485 p. (in Russ.).
19. Semenov V. M., Tulina A. S. Comparative characteristics of the mineralized organic matter in the soils of natural and agricultural ecosystems. Agrochemistry, 2011, No 12, pp. 53–63 (in Russ.).

20. Semenov V. M., Kogut B. M., Lukin S. M. et al. Assessment of the availability of soils with active organic matter based on the results of long-term field experiments. *Agrochemistry*, 2013, No. 3, pp. 19–31 (in Russ.).
21. Semenov V. M., Kuznetsova T. V., Khodzhaeva A. K. et al. Nitrous oxide emission in soils: influence of natural and agrogenic factors. *Agrochemistry*, 2004, No. 1, pp. 30–39 (in Russ.).

Информация об авторах

Высоцкая Н. А. – заместитель начальника отдела научно-технической информации, Закрытое акционерное общество «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», г. Солигорск, Минская область, Республика Беларусь, onti@sipr.by.

Пискун Е. В. – инженер по научно-технической информации (аспирантка Белорусского государственного университета транспорта), Закрытое акционерное общество «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством», г. Солигорск, Минская область, Республика Беларусь.

Information about the Authors

N. A. Vysotskaya – Deputy Head of Department of scientific and technical information, Closed Joint-Stock Company Soligorsk Institute for Resource Saving Problems with Pilot Production; Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus, onti@sipr.by.

E. V. Piskun – Engineer of scientific and technical Information (post-graduate student of Belarusian State University of Transport), Closed Joint-Stock Company Soligorsk Institute for Resource Saving Problems with Pilot Production; Soligorsk, Minsk region, Republic of Belarus.

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-181-187

Behaviour of Pollutants in the Upper Reaches of East Jiu River Case Study

A. F. Simion¹, M. Lazar², C. Drebenstedt³

¹National Institute for Research and Development in Mine Safety and Protection to Explosion–INSEMEX Petroșani, Romania

²University of Petrosani, Petrosani, Romania

³Technische Universität Berg Akademie Freiberg, Freiberg, Germany

Abstract: Surface water pollution is one of the consequences of modern society development through permanent pressures on the environment imposed by economic activities to provide the necessary resources for keeping modern living standards. Degradation of fresh water bodies is caused by the disappearance of natural water collection areas, deforestation and unsustainable farming practices, river pollution with wastes and the discharge of non-treated domestic and industrial wastewater into natural recipients. The main purpose of the mathematical modeling of rivers is to predict pollution dispersal in longitudinal and transversal directions, taking into account water body mixing coefficient. This paper is devoted to monitoring of physico-chemical indicators in the sampled river reaches and simulation of pollutant dispersal in the upper reaches of the East Jiu river.

Keywords: surface water pollution, environment, flow dynamics computation, mining, water.

For citation: Simion A. F., Lazar M., Drebenstedt C. Behaviour of pollutants in the upper reaches of East Jiu River case study. *Mining Science and Technology*. 2019;4(3):181-187. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-181-187.

Анализ распространения загрязняющих веществ

на примере верховьев р. Ист Джиу

Симион А. Ф.¹, Лазар М.², Дребенштедт К.³

¹National Institute for Research and Development in Mine Safety and Protection to Explosion–INSEMEX, Петрошани, Румыния

²University of Petrosani, Петрошани, Румыния

³Фрайбергская горная академия, Фрайберг, Германия

Аннотация: Загрязнение поверхностных вод является одним из последствий развития современного общества и экономической деятельности на основе эксплуатации природных ресурсов с оказанием постоянного давления на окружающую среду – в целях поддержания высокого уровня жизни здесь и сейчас. Деградация пресноводных водоемов вызвана исчезновением природных водосборных площадей, вырубкой лесов и истощающими природные ресурсы и экологически опасными методами ведения сельского хозяйства, загрязнением рек мусором и сбросом бытовых и промышленных сточных вод в природные водоемы без надлежащей очистки. Основной целью математического моделирования рек является прогнозирование распространения загрязняющего вещества в продольном и поперечном направлении с учетом коэффициента перемешивания вод водоема. Эта статья посвящена мониторингу физико-химических показателей вод на участках отбора проб воды, а также моделированию рассеяния загрязняющих веществ в верхнем течении реки Ист Джиу.

Ключевые слова: загрязнение вод, окружающая среда, расчет динамики водных потоков, горные работы, воды.

Для цитирования: Симион А. Ф., Лазар М., Дребенштедт К. Анализ распространения загрязняющих веществ на примере верховьев р. Ист Джиу. *Горные науки и технологии*. 2019;4(3):181-187. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-181-187.



1. Introduction

Study of water streams involves continuous modeling of material behavior at macroscopic level, in the form of the study of fluids in terms of steady state and fluctuation (dynamics), as well as investigating interactions between fluids and solid surfaces. These complex phenomena are studied mainly by fluid mechanics, which is based on the principles of classical physics (mechanics) [5]. Fluid mechanics approach in natural conditions is, however, complicated by the fact that in most cases the flow is turbulent, which implies high degree of complexity [5]. Importance of the question under consideration is connected with limited global reserves of freshwater and their contamination caused by anthropogenic activities. From qualitative, water has a microbiological and a physico-chemical components, which permanently interact with aquatic ecosystems. The paper objectives are to monitor water quality parameters in the sampled areas/sections and study the time-dependent and spatial evolution of pollutant concentrations in the upper reaches of East Jiu River. Possible sources of pollution in the studied area are mining, waste disposal, agriculture, and wood processing, and the components to be monitored are heavy metals, anions, cations, pH, phenols, total phosphorus and suspended solids [1, 2, 4].

2. Methodology of the river pollutant behavior simulation

The simulation of pollutant behaviour in water courses using specialized software requires thorough study of the investigated area in terms of monitoring of hydrodynamic regime and physico-chemical parameters of the water [3, 5].

Simulation of pollutant dispersion in surface water requires prior determining river bed geometry, followed by equation meshing and setting the boundary conditions. For this simulation of the pollutant dispersion, the Surface Water Modeling System (SWMS) software was used, which involves two steps:

1. The first step included modeling the sector dynamics using RMA2 module with topogra-

phy and river bathymetry, as well as dynamic elements, as input data.

2. The second step covered modeling the pollutant concentration field evolution (pollutant dispersion) using RMA4 module with the first step RMA2 module data as input data.

The Navier-Stokes equation system in the Reynolds form for the Cartesian coordinates x and y is used to simulate dynamic water flow elements together with the continuity equation for free-flowing incompressible fluids in conditions of turbulent motion:

– Navier-Stokes equations (Eq.1, 2):

$$h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + E_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{gun^2}{\left(h^{1/6} \right)^2} \times \times (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \sin \psi + 2h\omega v \sin \varphi = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left(\frac{\partial u}{\partial x} + E_{xy} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0; \quad (2)$$

– the continuity equation (Eq.3):

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left(E_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + E_{yy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left(\frac{\partial H}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{gvn^2}{\left(h^{1/6} \right)^2} \times \times (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \sin \omega + 2h\omega v \sin \varphi = 0, \quad (3)$$

where:

h – water depth (m);

u – local velocity in x direction (m/s);

v – local velocity in y direction (m/s);

t – time (s);

ρ – water density (kg/m³);

g – gravitational acceleration (m/s²);

E – coefficients of turbulent viscosity (Pa.s or kg/m/s), which is calculated automatically using

Peclet number: $Pe = \frac{\rho U dx}{E}$, in which

$U = \sqrt{u^2 + v^2}$ is average resultant speed, and dx – length element in the direction of flow;

H – elevation of the river bed (m);

n – Manning coefficient of roughness;

ζ – empirical coefficient of air friction;

V_a – wind velocity (m/s);

ψ – wind direction (degrees in the inverse direction from the positive axis);

ω – angular rotation speed of the Earth (rad/s);

φ – location latitude [6].

Fundamental equation of advection-dispersion (Eq. 4) is used for determining evolution of pollutant concentration field:

$$h \left(\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial x} D_x \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} D_y \frac{\partial c}{\partial y} - \sigma - kc + \frac{R(c)}{h} \right) = 0,$$

where:

c – pollutant concentration (mg/dm^3);

D_x and D_y – coefficients of turbulent diffusion in x and y direction;

k – permanent degradation (s⁻¹);

σ – local pollutant source (concentration measure unit);

h – water depth (m);

(c) – precipitation/evaporation (concentration measure unit, m/s).

The first term in the equation signifies local variation of concentration; the second term is the advective term in x direction; the third term is the advective term in y direction; the fourth is the term of dispersion in x direction; the fifth is the term of dispersion in y direction; the sixth term means the local pollutant source; the seventh term shapes the pollutant exponential; and eighth term reflects the effect of precipitation/evaporation [7].

The SWMS RMA2 module was used under the assumption of hydrostatic pressure; the accelerations in vertical direction are negligible. It is two-dimensional in horizontal plane. It is not intended to be used for near field problems where vortices, vibrations, or vertical accelerations are of primary interest. Vertically stratified flow effects are beyond the capabilities of RMA2 [6].

3. Simulation of pollutants in upper reaches of East Jiu River

The reach covered by the study of pollutant dispersal is represented by the confluence of Taia River with East Jiu River, approximately 1.2 km long with the river bed elevation difference of 7 m (Fig.1).

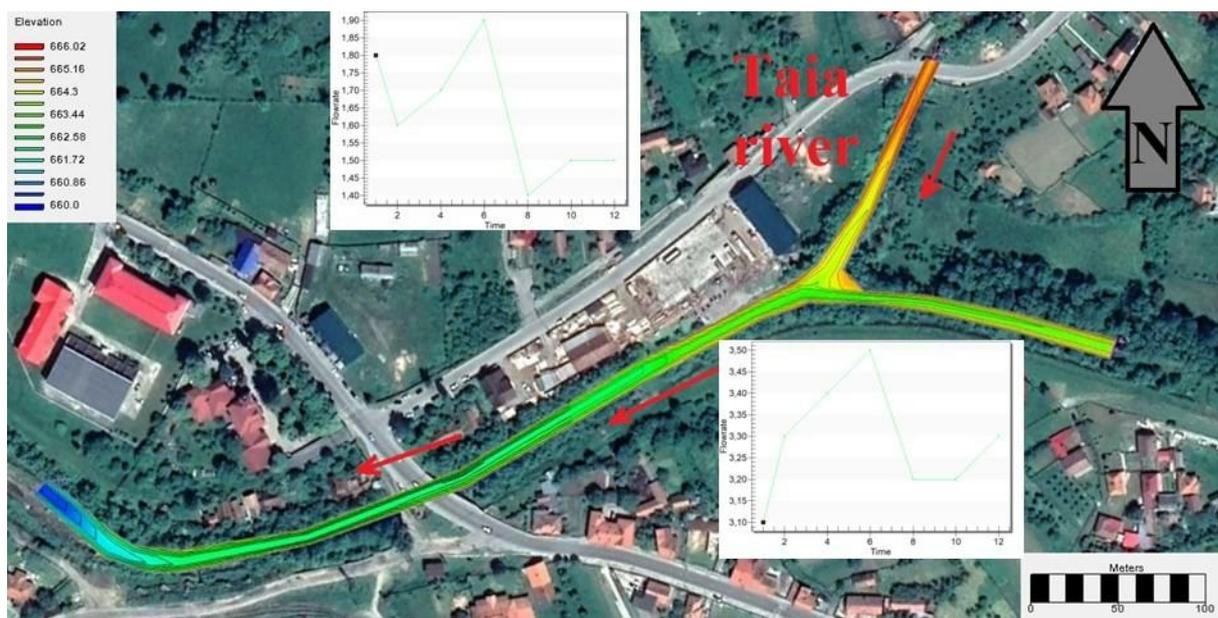


Fig. 1. Elevation of the river bed

Table 1

Domain dynamics elements							
Boundary condition	Time (h)						
	1	2	4	6	8	10	12
Water temperature (°C)	8						
Density (kg/m ³)	999						
Taia river							
Flow rate (m ³ /s)	1.8	1.6	1.7	1.9	1.4	1.5	1.5
East Jiu river							
Flow rate (m ³ /s)	3.1	3.3	3.4	3.5	3.2	3.2	3.3



Fig. 2. Field of velocity in V_x direction

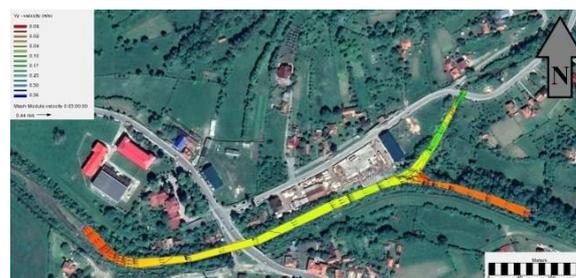


Fig. 3. Field of velocity in V_y direction

Table 2

Physical and chemical analyzes of water samples in the river reaches

Indicator \ Sampling point	Raul jiu Amont Taia	Râul taia amonte	Jiet amonte
Temperature, °C	8.1	7.8	5.9
pH	6.7	7.41	7.08
Conductivity, $\mu\text{S}/\text{m}^2$	145.6	138.5	159.4
TDS*, mg/l	83.9	88.9	92.7
Turbidity, NTU	46.5	45.7	9
Sodium, mg/l	15.1	14.5	15.8
Dissolved O ₂ , mg O ₂ /l	11.91	12.23	14.81
BOD ₅ , mg/l	6.34	6.24	3,46
Total phosphorus, mg/l	0.14	0.10	traces
Nitrite NO ₂ ⁻ , mg/l	0.11	0.16	0.01
Nitrate NO ₃ ⁻ , mg/l	3.14	2.34	0.84
Sulphate, mg/l	68.9	62.4	21.5
Phenols, $\mu\text{g}/\text{l}$	0.8	1.12	traces
Arsenic, $\mu\text{g}/\text{l}$	14	17	3
Chromium, $\mu\text{g}/\text{l}$	3	4	traces
Copper, $\mu\text{g}/\text{l}$	5	6	2
Lead, $\mu\text{g}/\text{l}$	traces	traces	5
Mercury, $\mu\text{g}/\text{l}$	traces	traces	traces

The computational domain for the two water courses was divided into 3 sub-domains, the left bank, the right bank, and the main river bed, because the study of pollutant dispersal (based on measuring pollutant concentrations) provides for both longitudinal analysis of the dispersal and the dispersal in the direction transverse to the flow analysis, especially in conditions of me-

andering course. Field observations provided data on the flow dynamics in the modeled sector (Table 1) required to estimate accurate flow velocities in the three sub-domains.

For the simulation, the following conditions were taken into account as the model restrictions: Coriolis force, precipitation and evaporation ratio, wind regime, and Manning coeffi-

cient of roughness calculated based on the bed structure (from 0.010 for boulder bed to 0.030 for vegetation bed).

3.1. Simulation of dynamic elements

Numerical simulation using the RMA2 application was performed over a 12-hour period to determine the velocity fields in x-direction (Fig. 2) and y-direction (Fig. 3).

The analysis of the two velocity fields showed that the maximum velocity of the particles motion is 0.36 m/s in x direction and 0.17 m/s in y direction. To verify the stability of the RMA2 numerical modeling, the Froude number was used.

3.2. Simulation of pollutants dispersal

The modeling of the concentrations in the river reaches involved water samples collected in three sampling points (Table 2) as follows: a blank sample taken upstream of the East Jiu river

basin to determine the background concentration and two samples taken in the upper boundary of the computation domain (Fig. 1).

The pollutant dispersal modeling was performed for the physico-chemical parameters classified in the lower quality classes according to the Norm 161 of February 16, 2006. Thus, sulfate and nitrate were concentrations studied, for which constant background concentration of 21.5 mg/l and 0.84 mg/l, respectively, was established for the 12-hour simulation period.

For the reach of Taia River the following behaviour was determined: in one hour after the reach simulation start, maximum nitrate and sulfate pollution concentrations are achieved (Fig. 4) and (Fig. 5), respectively, and then they drops and since the 7th hour for the rest of the 12-hour period returns to the background concentrations.

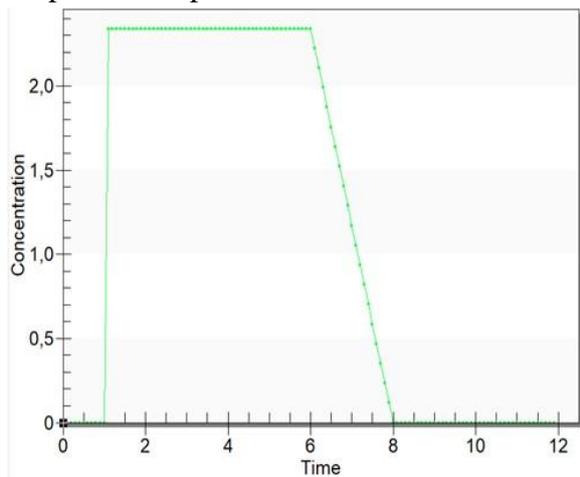


Fig. 4. Nitrate concentration trend

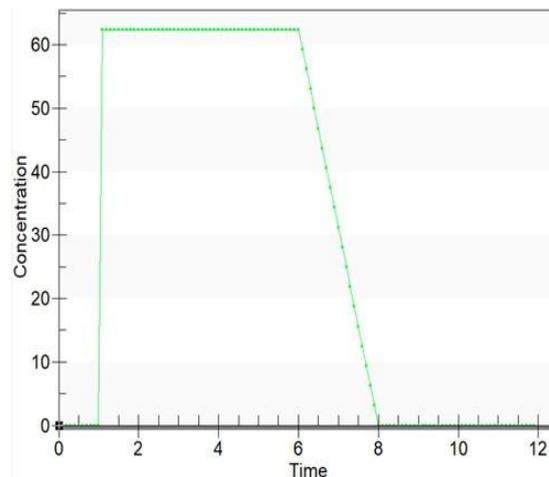


Fig. 5. Sulphate concentration trend

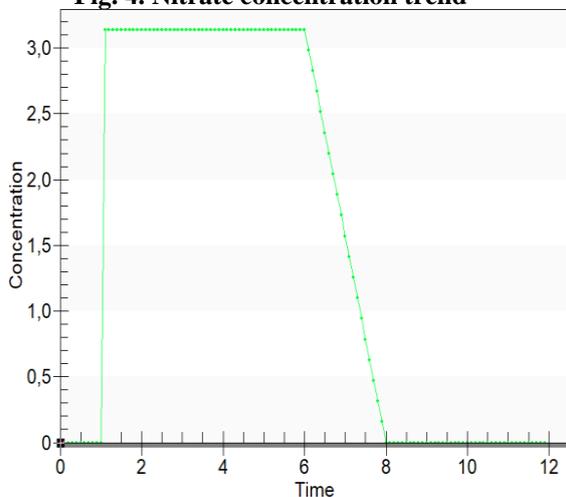


Fig. 6. Nitrate concentration trend

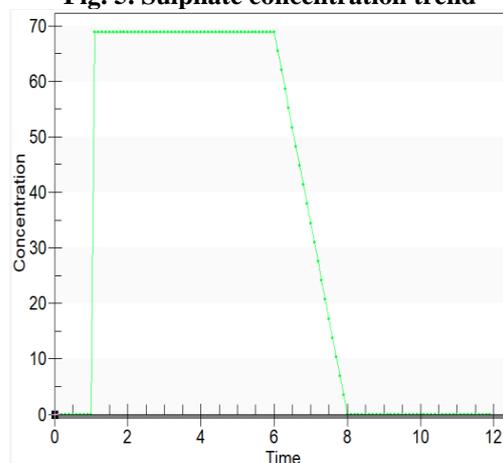


Fig. 7. Sulphate concentration trend



Fig. 8: Concentration of nitrate in 2 hours



Fig. 9: Concentration of nitrate in 3 hours



Fig. 10: Concentration of nitrate in 8 hours



Fig. 11: Concentration of sulphate in 2 hours



Fig. 12: Concentration of sulphate in 3 hours



Fig. 13: Concentration of sulphate in 8 hours

The dispersal maps for the nitrate and sulphate indicators have been prepared for the moments of 2, 3 and 8 hours after starting the simulation (Fig. 8 to Fig. 13) to demonstrate the evolution of the pollutant in the aquatic environment both at the modeled field entry and exit.

Calibration of the mathematical model was performed based on the concentrations obtained by direct laboratory measurements (Table 2) and the values obtained from the computerized simulation with variation of the Peclet number within the acceptable limits (15–40).

Similar behavior was determined for the East Jiu River reach: in one hour after the reach simulation start, maximum nitrate and sulfate pollution concentrations are achieved (Fig. 6) and (Fig. 7), respectively, and then they drops and since the 7th hour for the rest of the 12-hour period returns to the background concentrations.

4. Discussion

The studied river reach is located in an anthropized area, which can be influenced by

local mining (Lonea mine), agriculture, animal husbandry, woodworking, road traffic. Pollutants generated by these economic activities achieve the natural surface water bodies through different mechanisms and ways and once they reach the water bodies they produce significant impact on the aquatic and terrestrial ecosystems. In the impacted water reaches the pollutants concentrations in water depend mainly on: water flow rate, the material composing the riverbed, the terrain and regional climate.

The computerized simulations show that the nitrate concentration is reduced by half in the East Jiu River.

In the studied area, increasing the concentration of pollutants on the watercourse banks is determined, which increases the risk of degradation of the riparian ecosystems. The pollutants ingested by living organisms are transferred along the food chain, producing unfavorable impacts on the ecosystems.

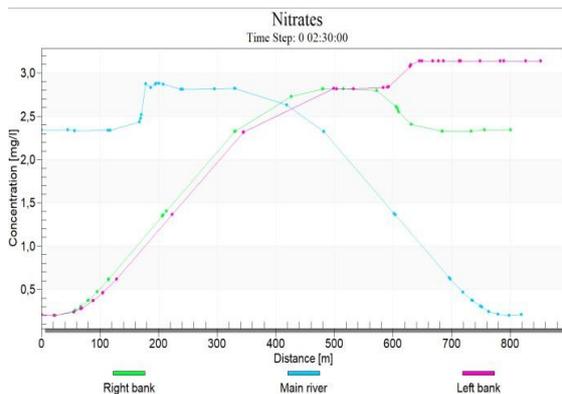


Fig. 14: Dispersal of nitrate concentration in 2 hours

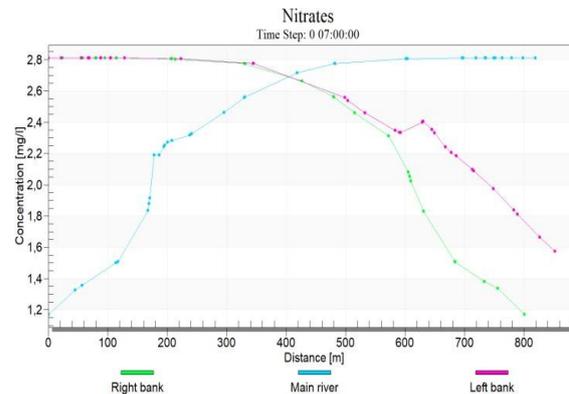


Fig. 15: Dispersal of nitrate concentration in 7 hours

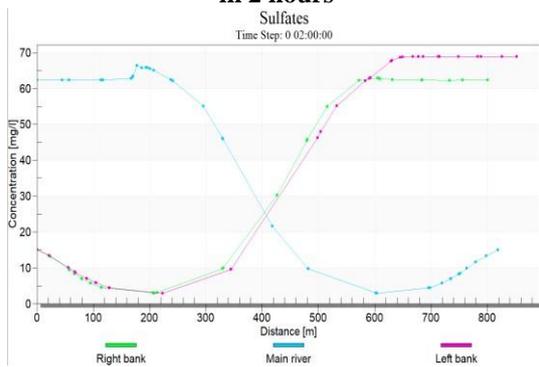


Fig. 16: Dispersal of sulfate concentration in 2 hours

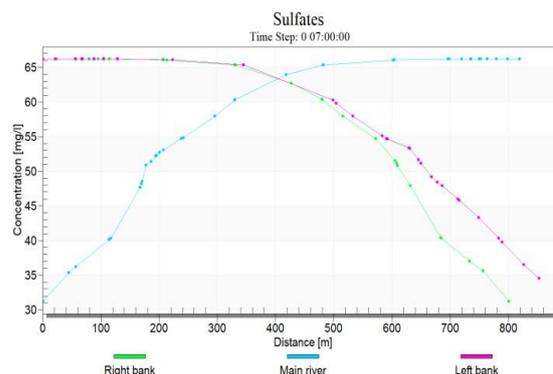


Fig. 17: Dispersal of sulfate concentration in 7 hours

5. Conclusions

From view point of environmental pollution estimation, the use of Computational Fluid Dynamics modeling tools to determine the pollution dispersal and impact on water bodies is quite effective as it is a tool allowing to view data across the studied field based on minimal number of rather expensive water assays and, thus, save money and time.

Advection processes predominate in the East Jiu river basin, and, in the main course of the river, dispersal processes prevail, mainly due

to the riverbed material, and watercourse and local turbulence. In terms of pollutant dispersal, there is a close link between the water flow rate and the amount of pollutant getting into the aquatic environment. Dilution of pollutants in the aquatic environment may take place in terms of decreasing pollutant concentrations, but additional amounts of pollutants contributed by various tributaries from the southern and eastern parts of the area lead to increasing pollution downstream in the river basin.

References

1. Lazar M., Dumitrescu I., Anthropic impact on the environment, Universitas Publishing House, Romania, 2006.
2. Lazar M., The rehabilitation of the degraded lands, Universitas Publishing House, Romania, 2010.
3. Mitroiu C., Marin., Ingineria Răurilor – Regularizarea albiilor râurilor și îndiguiri, Bren Publishing House, Romania, 1999.
4. Rotunjanu I., Lazăr M. Hydrology and mining hydrogeology minieră. Universitas Publishing House, Petroșani, Romania, 2014.
5. Stephen B. P. Turbulent Flows, Cambridge university press.
6. Surface Water Modeling System – RMA2. US Army Engineer Research and Development Center, AquaVeo, USA, 2011.
7. Surface Water Modeling System – RMA4. US Army Engineer Research and Development Center, AquaVeo, USA, 2011.

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-188-201

Диагностирование теплового состояния электромеханического оборудования

Борисенко В. Ф.¹, Землянский А. И.¹, Сидоров В. А.¹, Сидорова Е. В.²

¹Донецкий национальный технический университет, г. Донецк, ✉andrewiz@yandex.ua

²Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Россия

Аннотация: В работе рассмотрены вопросы контроля теплового состояния объектов промышленной группы производственных механизмов на основе обобщенного подхода к пониманию причин и целей диагностирования электромеханических систем (ЭМС) по текущим значениям температуры. Обобщенная математическая модель ЭМС (однородного тела или многомассовой расчетной тепловой схемы замещения) для различных режимов работы объекта позволяет обозначить диагностические признаки (критерии) для принятия конкретных мер по стабилизации его работы. Повышение эффективности контроля теплового состояния объектов можно достичь при использовании приборов бесконтактного измерения распределения температур по всей поверхности объекта. По виду распределения температур по поверхности объектов ЭМС можно сделать вывод о необходимости проведения ремонтных работ. Для эффективного использования бесконтактной тепловизионной техники для диагностики ЭМС на основе изложенных в статье положений разработана программа подготовки специалистов по термометрированию промышленных объектов.

Ключевые слова: тепловой контроль, электромеханическая система, тепловая расчетная масса, распределение температур, диагностический признак.

Для цитирования: Борисенко В. Ф., Землянский А. И., Сидоров В. А., Сидорова Е. В. Диагностирование теплового состояния электромеханического оборудования. *Горные науки и технологии*. 2019;4(3):188-201. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-188-201.

Diagnostics of Thermal Condition of Electromechanical Machinery

V. F. Borisenko¹, A. I. Zemlyansky¹, V. A. Sidorov¹, E. V. Sidorova²

¹Donetsk National Technical University, Donetsk, ✉andrewiz@yandex.ua

²Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia

Abstract: The paper is devoted to studying issues of machinery thermal state monitoring using generalized approach to objectives of electromechanical system (EMS) diagnostics based on current temperature values. Generalized mathematical model of EMS (a homogeneous body or a multi-weight estimated heat balance diagram) for various operation conditions of a facility allows to identify diagnostic indicators (criteria) for taking specific measures to stabilize its operation. Increasing efficiency of the facility thermal state monitoring can be achieved using non-contact measuring instruments to determine temperature distribution over the facility surface. Temperature distribution over an EMS facility surface enables concluding on maintenance necessity. For effective application of non-contact thermal-imaging equipment for diagnostics of EMS on the basis of the provisions presented in the paper, training program for specialists in thermomentering of industrial facilities has been developed.

Keywords: thermal monitoring, electromechanical system, thermal estimated weight, temperature distribution, diagnostic indicator.

For citation: Borisenko V. F., Zemlyansky A. I., Sidorov V. A., Sidorova E. V. Diagnostics of thermal condition of electromechanical machinery. *Mining Science and Technology*. 2019;4(3):188-201 (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-188-201.

Введение

Вопросы диагностирования технического состояния электромеханических систем

(ЭМС) в настоящее время стоят довольно остро, что объясняется физическим и моральным износом действующего промыш-



ленного оборудования, срок реновации которого давно истек. Стремление продлить его работу ставит перед обслуживающим персоналом и научными кадрами задачу текущего контроля объекта и его узлов на основе последних достижений науки и техники.

В промышленности используется большое число производственных механизмов, приводимых в движение различными типами двигателей. Это могут быть ветро-, пневмо-, гидро-, электродвигатели. Каждый тип привода обладает своими особенностями, спецификой применения и условиями эксплуатации. В процессе осуществления рабочей операции происходит нагрев отдельных элементов (звеньев) системы, причем некоторые звенья нагреваются до таких температур, которые недопустимы по условиям технологического процесса и нормального (нормативного) функционирования механизма. Нагрев элементов блоков системы возможен за счет трения, теплоизлучения, конвекции, протекания недопустимых токов по обмоткам электродвигателей в случае плохих (слабых) контактов в цепях коммутационной аппаратуры, при недостаточном охлаждении трансформаторов и др.

С другой стороны, механическая часть системы испытывает нагрузки на кручение (валы, оси), на растяжение-сжатие (канаты, штоки); шестерни испытывают контактную нагрузку, которая может существенно отличаться от расчетной (номинальной) при пуско-тормозных режимах и частых реверсированиях. При всех возможных режимах работы ЭМС механическая прочность не должна падать ниже так называемой точки бифуркации, когда нарушается закон Гука и происходят структурные изменения в металле. В общем случае контроль технического состояния системы должен базироваться на показателях работы электрической и механической частей системы одновременно.

Визуальный осмотр объекта, контроль текущих величин энергопотребления не дают убедительных ответов на текущее безаварий-

ное состояние объекта. Имеют место многократные попытки контролировать тепловое состояние наиболее ответственных звеньев электромеханической системы (подшипников, статоров, якорей двигателей). В случае превышения необходима разгрузка механизма или отключение системы.

Контроль температуры отдельных элементов в этом случае позволяет оценить не только степень нагрева, но и техническое состояние объекта, используя логические зависимости при диагностировании. Повышение температуры сопровождается появлением и развитие ряда неисправностей. Органолептическое восприятие температуры позволяет сделать вывод на уровне «холодно», «тепло», «горячо». Контактное измерение температуры при локализации точки контроля не позволяет судить о состоянии объекта в целом. Бесконтактное измерение с использованием инфракрасной тепловизионной аппаратуры позволяет перейти к анализу тепловой картины объекта, выделив информативные узлы наиболее наглядным образом – путем визуализации тепловой картины. Интерес к решению данных вопросов подтверждается увеличением количества работ, посвященных этой теме, опубликованных в последние годы [1...9]. Анализ данной картины включает много аспектов, рассмотрению некоторых из них относительно оптимизации процесса диагностирования и подготовки специалистов посвящена данная статья.

Контроль теплового состояния элементов электрической части системы. Любая электромеханическая система содержит одни и те же элементы: источник питания, управляемый преобразователь, приводной электродвигатель, промежуточное механическое звено (редуктор), исполнительный орган или механизм [10...12]. Энергия к предприятию подводится на высоком напряжении линий электропередачи (ЛЭП) и на главной понизительной подстанции трансформируется в напряжения 35 и 10 кВ. Далее по кабельным линиям она поступает на цехо-

вые подстанции, где происходит дальнейшая трансформация напряжения под нужды конкретных потребителей. В качестве основных потребителей в цехах выступают приводные двигатели (синхронные, асинхронные) на напряжения 10, 6, 3, 0,4 кВ; преобразовательные агрегаты – тиристорные регуляторы напряжения (на постоянном и переменном токе), тиристорные преобразователи частоты (с непосредственной связью или со звеном постоянного тока). Преобразователи питают двигатели постоянного или переменного тока в системах ТП-Д, ТРН-АД, ТПЧ-АД, ТПЧ-СД. Системы электропривода могут работать в одном из восьми режимов $S1...S8$, основными из которых считаются длительный ($S1$), кратковременный ($S2$), повторно-кратковременный ($S3$). Каждому режиму присущи свои особенности работы по условиям нагрева [13, 14, 16...19]. У двигателей наиболее слабым звеном считается его изоляция. Оценить тепловое состояние двигателя возможно, используя один из рассмотренных далее подходов. Наиболее простой случай – представление двигателя однородным телом [10, 11] и решение уравнения

$$\tau = \tau_{уст} (1 - e^{-t/T_n}) \quad (1)$$

где $\tau_{уст}$ – установившаяся температура перегрева; T_n – постоянная времени нагрева.

В настоящее время в большинстве случаев используется изоляция классов F и H . Уравнение (1) представляет экспоненциальную зависимость, температура перегрева, близкая к установившейся, будет достигнута через время $t = 3T_n$, $\tau = 0,95\tau_{уст}$. В зависимости от класса изоляции можем судить о тепловом состоянии двигателя:

$$\tau_{тек} < \tau_{доп.изл},$$

где $\tau_{тек}$ – текущее значение температуры нагрева; $\tau_{доп.изл}$ – допустимая температуры нагрева для данного класса изоляции.

Реально двигатель не является однородным телом, а состоит из множества элементов. Поэтому желание наиболее точно оценить тепловое состояние двигателя приводит

к представлению последнего многомассовой расчетной схемой. Число расчетных масс тепловой схемы замещения (ТСЗ) двигателя в зависимости от конкретной задачи может приниматься от 2 до 15...17 [12, 13, 15, 20]. Для практических расчетов ТСЗ не превышает 5...7, результаты расчетов дают возможность оценить тепловое состояние каждой из расчетных масс и выявить более нагретую.

Тепловое состояние n -го тела может быть описано следующим уравнением:

$$C_n \frac{d\theta_n}{dt} = \sum_{i=1}^{q(i \neq n)} \Lambda_{in} (\theta_i - \theta_n) + P_n, \quad (2)$$

где C_n – теплоемкость n -го тела; θ_n – температура n -го тела; θ_i – температура одного из соседних тел i ; q – количество тел, связанных в тепловом отношении с рассматриваемым телом n ; Λ_{in} – теплоотдача от одного из соседних тел i к данному телу n ; P_n – потери мощности в данном теле n ; t – текущее время.

Для схемы из n тел уравнения теплового баланса будут иметь следующий вид [10, 13]:

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\theta_1}{dt} = \left(- \sum_{i=2}^m \Lambda_{i1} \right) \theta_1 + \sum_{i=2}^m \Lambda_{i1} \theta_i + P_1, \\ C_2 \frac{d\theta_2}{dt} = \left(- \sum_{i=1}^{k(i \neq 2)} \Lambda_{i2} \right) \theta_2 + \sum_{i=1}^{k(i \neq 2)} \Lambda_{i2} \theta_i + P_2, \\ \dots, \\ C_n \frac{d\theta_n}{dt} = \left(- \sum_{i=2}^{q(i \neq n)} \Lambda_{in} \right) \theta_n + \sum_{i=2}^{q(i \neq n)} \Lambda_{in} \theta_i + P_n, \end{cases} \quad (3)$$

где m – количество тел, связанных в тепловом отношении с первым телом; k – количество тел, связанных в тепловом отношении со вторым телом.

Решение системы приводит к определению средней температуры n -го тела в момент времени t .

Уравнения теплового баланса целесообразно привести к виду

$$\begin{cases} C_{M1} \frac{d\theta_{M1}}{dt} = P_{M1}(t), \\ C_{M2} \frac{d\theta_{M2}}{dt} = P_{M2}(t), \end{cases} \quad (4)$$

где C_{M1} , C_{M2} – полные теплоемкости обмоток статора и ротора; θ_{M1} , θ_{M2} – текущие значения

температур обмоток; $P_{M1}(t)$, $P_{M2}(t)$ – текущие значения электрических потерь в обмотках статора и ротора.

При исследовании динамики, например, асинхронного электропривода его поведение описывается системой дифференциальных уравнений в осях x , y [10...12]:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{sx}}{dt} = U_{sx} - \frac{1}{T_{s1}}\psi_{sx} + \frac{k_r}{T_{s1}}\psi_{rx} - \omega_s\psi_{sy}, \\ \frac{d\psi_{sy}}{dt} = -\frac{1}{T_{s1}}\psi_{sy} + \frac{k_r}{T_{s1}}\psi_{ry} - \omega_s\psi_{sx}, \\ \frac{d\psi_{rx}}{dt} = -\frac{1}{T_{r1}}\psi_{rx} + \frac{k_s}{T_{r1}}\psi_{sx} + (\omega_s - Z_p\omega)\psi_{ry}, \\ \frac{d\psi_{ry}}{dt} = -\frac{1}{T_{r1}}\psi_{ry} + \frac{k_s}{T_{r1}}\psi_{sy} - (\omega_s - Z_p\omega)\psi_{rx}, \end{cases} \quad (5)$$

а выражение для электрических потерь имеет вид

$$\begin{cases} P_{M1}(t) = 3I_s^2 R_s, \\ P_{M2}(t) = 3I_r^2 R_r, \end{cases} \quad (6)$$

где $P_{M1}(t)$, $P_{M2}(t)$ – текущие значения электрических потерь в обмотках статора и ротора; I_s , I_r – действующие значения токов статора и ротора; R_s , R_r – активные сопротивления обмоток статора и ротора.

Мгновенные значения токов в обмотках электрической машины находим из системы уравнений, имеющей вид

$$\begin{cases} i_{sx} = \frac{1}{\sigma L_s}(\Psi_{sx} - k_r \Psi_{rx}), \\ i_{sy} = \frac{1}{\sigma L_s}(\Psi_{sy} - k_r \Psi_{ry}), \\ i_{rx} = \frac{1}{\sigma L_r}(\Psi_{rx} - k_s \Psi_{sx}), \\ i_{ry} = \frac{1}{\sigma L_r}(\Psi_{ry} - k_s \Psi_{sy}). \end{cases} \quad (7)$$

Действующие значения токов для подстанции в (6) получаем из (8):

$$\begin{cases} i_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{i_{sx}^2 + i_{sy}^2}, \\ i_r = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{i_{rx}^2 + i_{ry}^2}. \end{cases} \quad (8)$$

Зная текущие потери в статоре и роторе, можно перейти к определению температур обмоток θ_{M1} и θ_{M2} с помощью (4).

При исследовании пускового режима температуры обмоток θ_{M1} и θ_{M2} находятся при совместном решении (4) и (6). В дальнейшем они используются как начальные условия при исследовании теплового состояния двигателя при конкретном характере нагружения.

Примеры определения температур обмотки статора в лобовой и пазовой частях по изложенной методике приведены на рис. 1 [10]. На первом этапе работы двигателя виден интенсивный нагрев его элементов под действием пусковых токов $\approx 5,5 I_H$, далее процесс нарастания температур существенно замедляется, так как имеет место работа двигателя с постоянной нагрузкой и расчетными условиями охлаждения.

На рис. 2 приведены экспериментальные подтверждения теоретических постулатов для режима повторного включения двигателя конвейера и контроля лобовой части двигателя (рис. 2, а), увеличение скорости нагрева подшипника двигателя при нарушении режима смазки (рис. 2, б). Сложность практического использования любой теоретической модели заключается в отсутствии точного значения коэффициентов и расчетных значений. В этом случае используется методика взаимного или динамического сравнения контролируемых параметров.

При работе двигателя в режиме ПКР с частыми пусками интенсивность нагрева элементов машины возрастает в первые несколько десятков циклов, а далее имеет место переход в квазиустановившийся режим работы (по условиям нагрева). Получение в этом случае $\theta_{паз} > \theta_{доп}$ (для конкретного класса изоляции) будет диагностическим критерием для снижения нагрузки на двигатель или перехода на систему, ограничивающую пусковые токи, например ТРН-АД или ТПЧ-АД, ПЧ-АД. При использовании системы ПЧ-АД удастся уйти от перегрева двигателя при частых пусках (рис. 3).

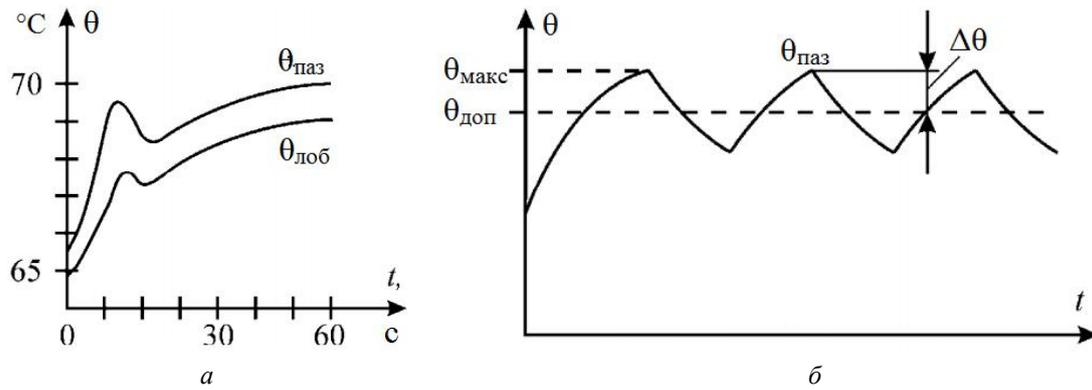


Рис. 1. Кривые нагрева $\theta(t)$ электродвигателя:
a – длительный режим; *b* – повторно-кратковременный режим (ПКР)

Fig. 1. Heating curves $\theta(t)$ of electric motor:
a – continuous service; *b* – intermittent service (IS)

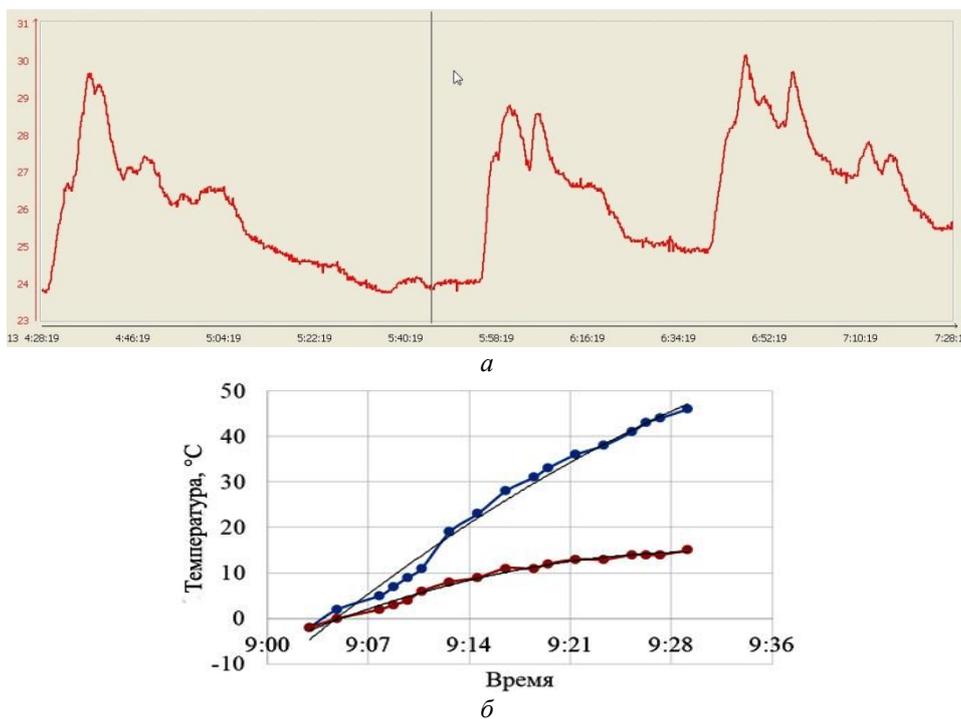


Рис. 2. Экспериментальные кривые нагрева узлов электродвигателей конвейера:
a – нагрев лобовой части двигателя конвейера при периодическом включении; *b* – рост скорости нагрева подшипника двигателя при нарушении режима смазки

Fig. 2. Experimental heating curves for conveyor electric motor units:
a – heating of frontal part of conveyor motor at intermittent operation; *b* – increasing heating rate of motor bearing at lubrication rate violation

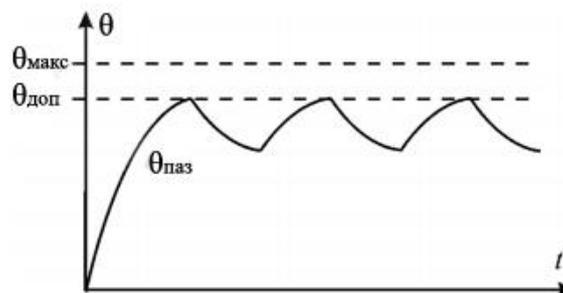


Рис. 3. Кривые $\theta(t)$ при работе системы ПЧ-АД

Fig. 3. Heating curves $\theta(t)$ for option with Frequency Converter - Induction Motor system operation

Подобные расчеты $\theta(t)$ для двигателя могут быть выполнены на этапе проектирования или для изменившихся условий эксплуатации электромеханической системы. С другой стороны, диагностическая модель системы может вести расчет текущего теплового состояния двигателя и адекватно реагировать в случае $\theta_{\text{паз тек}} > \theta_{\text{доп}}$.

Необходимым условием при контроле теплового состояния является учет параметров механической части привода. Суммарный момент инерции системы J_{Σ} для большинства производственных механизмов может рассматриваться в качестве постоянной величины. В тех случаях, когда момент инерции J_{Σ} является функцией угла поворота и его производных, величина его переменной составляющей обычно не превышает 10...20 % J_0 :

$$J_{\Sigma} = J_0 + J_K(\varphi, \dot{\varphi}). \quad (9)$$

В тепловой модели расчета потери энергии учитываются коэффициентом трения μ , значение которого меняется ступенчато при изменении режима смазывания, что и составляет основную неопределенность данного расчета. Так, при реализации жидкостного режима трения, соответствующего полному разделению движущихся поверхностей и исправному состоянию при длительном режиме

работы, $\mu = 0,003$. При граничном трении в момент запуска $\mu = 0,01$, а при сухом трении в момент возникновения повреждений значения становятся равными $\mu = 0,1$ вначале локально, а затем по всей площади соприкосновения элементов трения.

Существенное влияние на работу электромеханической системы оказывает источник питания. В общем случае это преобразователь (статический или электромеханический со своими особенностями работы), т.е. в общем случае должна рассматриваться система «управляемый преобразователь – двигатель» (на постоянном или переменном токе).

Полученные температуры расчетных масс модели (рис. 4) [10] могут служить диагностическим признаком (критерием) для оценки режима работы двигателя и принятия конкретных мер по стабилизации его работы. Необходимо заметить, что данная методика довольно сложна и требует затрат времени на определение удельных теплоемкостей, коэффициентов теплопередачи, составление и набор модели, ее наладку, привлечение специалистов с высоким уровнем подготовки в области ЭМС и нагрева.

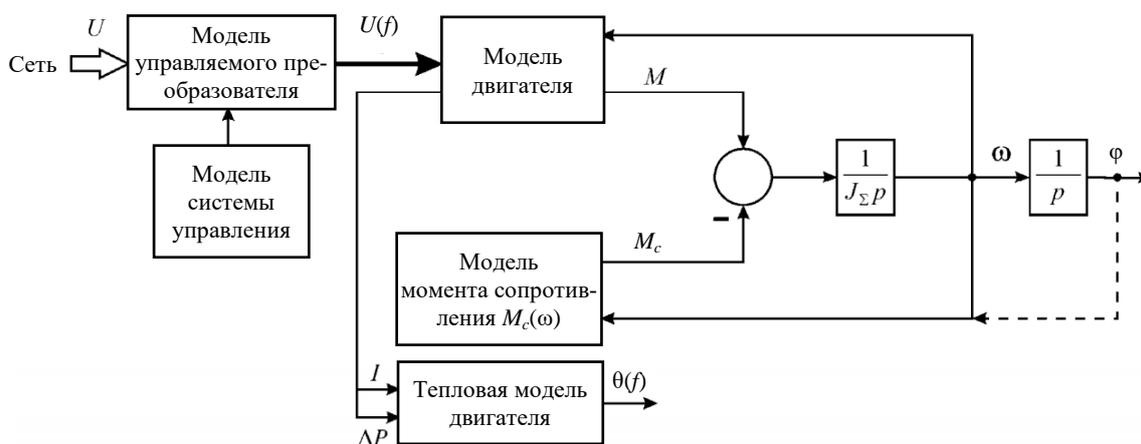


Рис. 4. Модель системы при упрощенном учете механической части ЭМС

Fig. 4. System model with simplified accounting of EMS mechanical part

Практика контроля теплового состояния электромеханического оборудования. Существенно упрощается задача контроля теплового состояния объектов, если перейти к использованию специальных «тепловых» приборов – пирометров и тепловизоров. Действие этих приборов основано на фотоэлектрической регистрации интенсивности теплового излучения нагретых тел, пропорциональной их температуре. Тепловизор позволяет всесторонне оценить тепловое состояние двигателя и на его основе сделать вывод о возможности продолжения работы или необходимости проведения ремонтной операции.

Термограммы, приведенные на рис. 5, позволяют судить о тепловом состоянии двигателей и возможности дальнейшего функционирования машин. Термограмма (рис. 5, *a*) позволяет получить общее заключение о

тепловом состоянии двигателя, выделить зоны расположения полюсов обмоток статора и сделать вывод об удовлетворительном состоянии по значению максимальной температуры – 54,2 °С. Термограмма, приведенная на рис. 5, *б*, позволяет установить факт наличия неравномерного охлаждения статора электродвигателя, выделить зоны локального перегрева (рис. 5, *в*), контроль развития тенденций которых позволит предупредить наступление предельного состояния. Информация на термограмме рис. 5, *г* была использована практически мгновенно – перегрев одной из фаз до 58,1 °С (более чем на 20 °С превышающий температуру расположенных рядом однотипных элементов) мог привести к внеплановой остановке двигателя, повторный контроль показал равенство температур по фазам.

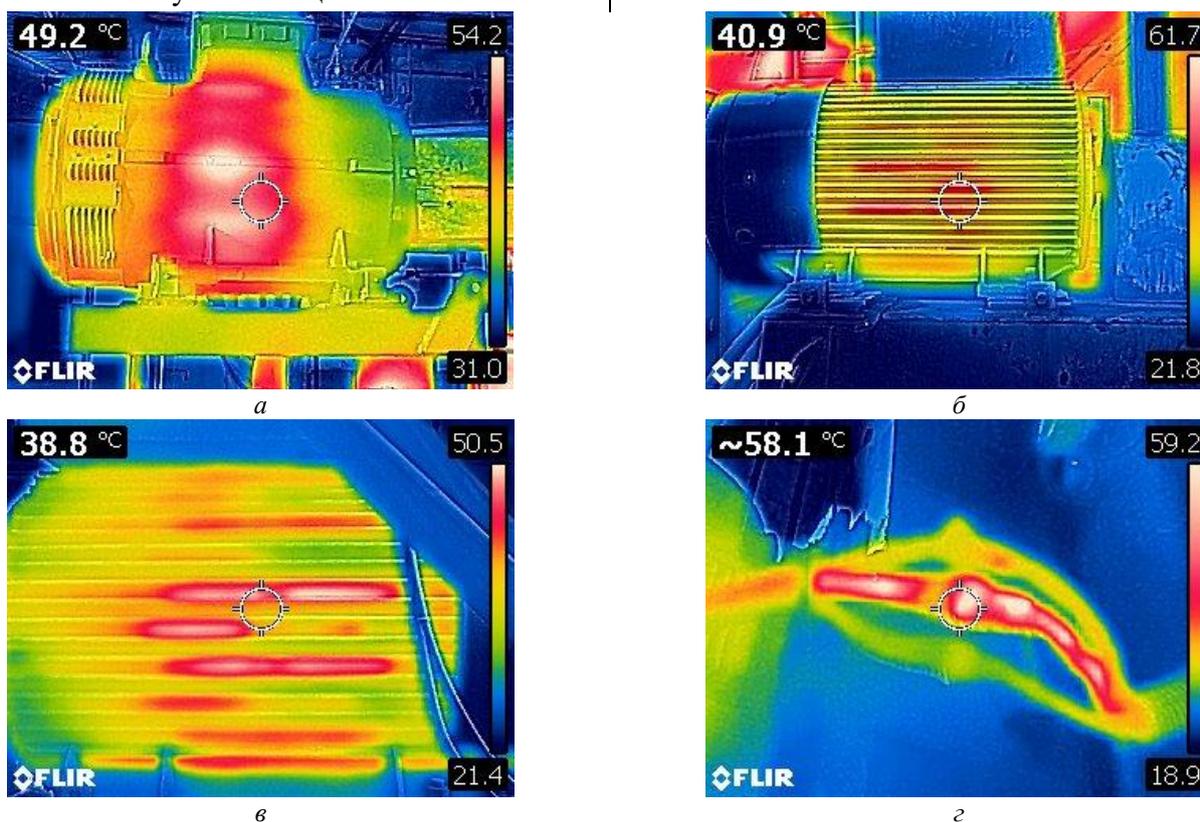


Рис. 5. Тепловое изображение электрической машины:

a – двигатель компрессора; *б* – двигатель – охлаждение статора; *в* – местные перегревы статора; *г* – нагрев одной фазы питания двигателя – недопустимое состояние

Fig. 5. Thermal image of electric machine:

a – compressor motor; *b* – motor – stator cooling; *c* – local overheating of stator; *d* – heating of one phase of motor power – unacceptable condition



Рис. 6. Насос горячей воды – запорная арматура без теплоизоляции

Fig. 6. Hot water pump – shut-off valving without thermal insulation



Рис. 7. Повышенный нагрев фазы В высоковольтного ввода (6 кВ) до 39 °С

Fig. 7. Increased heating of high voltage input (6 kV) phase B up to 39 °C

Оценка теплового состояния электрооборудования в зависимости от конструкции и условий эксплуатации осуществляется:

- по нормированным температурам нагрева (превышениям температуры);
- равномерности поверхностного теплового поля объекта;
- динамике изменения температуры во времени или с изменением нагрузки;
- путем сравнения измеренных значений температуры исправных и неисправных узлов.

Следует отметить, что не существует методов оценки степени неисправности дефектов на перегреваемых поверхностях оборудования. Перегревы могут быть вызваны скрытыми дефектами или тепловым излучением сторонних объектов. На рис. 6 приведено тепловое изображение насоса горячей воды, позволяющее оценить степень передачи тепла от насоса к лобовому подшипнику двигателя. Рис. 7 демонстрирует перегрев одной

из фаз силовой подстанции 6 кВ, устраненный при проведении текущего ремонта без последствий в виде внезапной остановки оборудования.

Полное термографическое обследование проводится при подготовке к проведению капитального ремонта. Снимаются термограммы поверхностей в местах контактов деталей, по поверхности объекта, фундаменту механизма. При обработке термограмм сравниваются между собой нагревы элементов, однотипных узлов и деталей, динамика изменения нагревов во времени и в зависимости от нагрузки, определяются локальные нагревы, места их расположения, сопоставляются места нагрева с расположением элементов механической и электрической части привода, определяется эффективность работы систем охлаждения. Анализ тепловых изображений диагностируемого оборудования должен учитывать наличие дефектов поверхности объектов, загрязнений и смазки.

Наиболее важным параметром для оценки теплового состояния объекта является его излучательная способность (количество излучения, испускаемого объектом по сравнению с излучением от абсолютно черного тела). Обычно излучательная способность поверхности объекта находится в диапазоне приблизительно 0,10...0,95. У полированной (зеркальной) поверхности излучательная способность ниже 0,1, в то время как у окисленной или окрашенной поверхности – 0,85...0,95. Например, краска на масляной основе, независимо от цвета в видимом спектре, имеет излучательную способность более 0,9 в инфракрасном диапазоне [1, 2, 21, 22].

Такие внешние факторы, как температура и влажность окружающего воздуха, при проведении термографирования можно не учитывать, поскольку суммарная ошибка из-

мерения температуры в этом случае не превышает 0,2 °С.

На рис. 8, 9 приведены термограммы базового оборудования сортового прокатного стана «390» – это нагревательная печь (ее механизмы), комплекс механизмов прокатной клетки (валки, шпиндели, редукторы, соединительные муфты, подшипники). Общеизвестно, что внимание в первую очередь необходимо обратить на входные и выходные подшипники, а также на подшипники прокатных валков (на стане используются два вида валков – вертикальные и горизонтальные) как наиболее нагруженные элементы. В некоторых случаях необходимо обращать внимание на тепловые отражения нагретого до температуры 1 000 °С прокатываемого слитка. Задача различения нагрева от теплового излучения и внутреннего нагрева элементов становится в данном случае весьма актуальной.

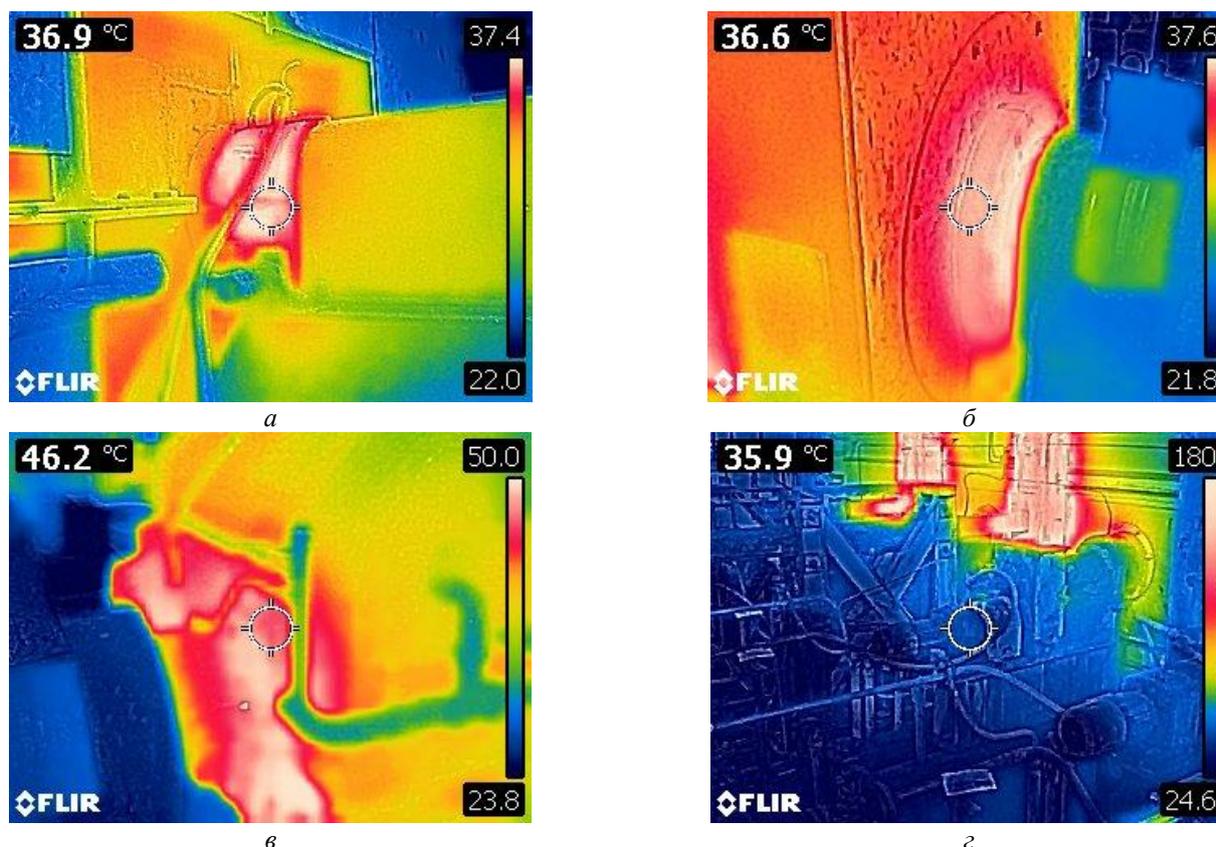


Рис. 8. Термограммы механических звеньев:

a – подшипниковая опора вентилятора, допустимый нагрев 37 °С; *б* – лобовой подшипник и соединительная муфта; *в* – редуктор и трубопроводы смазки; *г* – металлоконструкции печи

Fig. 8. Thermograms of mechanical components:

a – fan bearing assembly, permissible heating of 37 °С; *b* – frontal bearing and sleeve coupling; *c* – gearbox and lubrication pipes; *d* – furnace steel structures

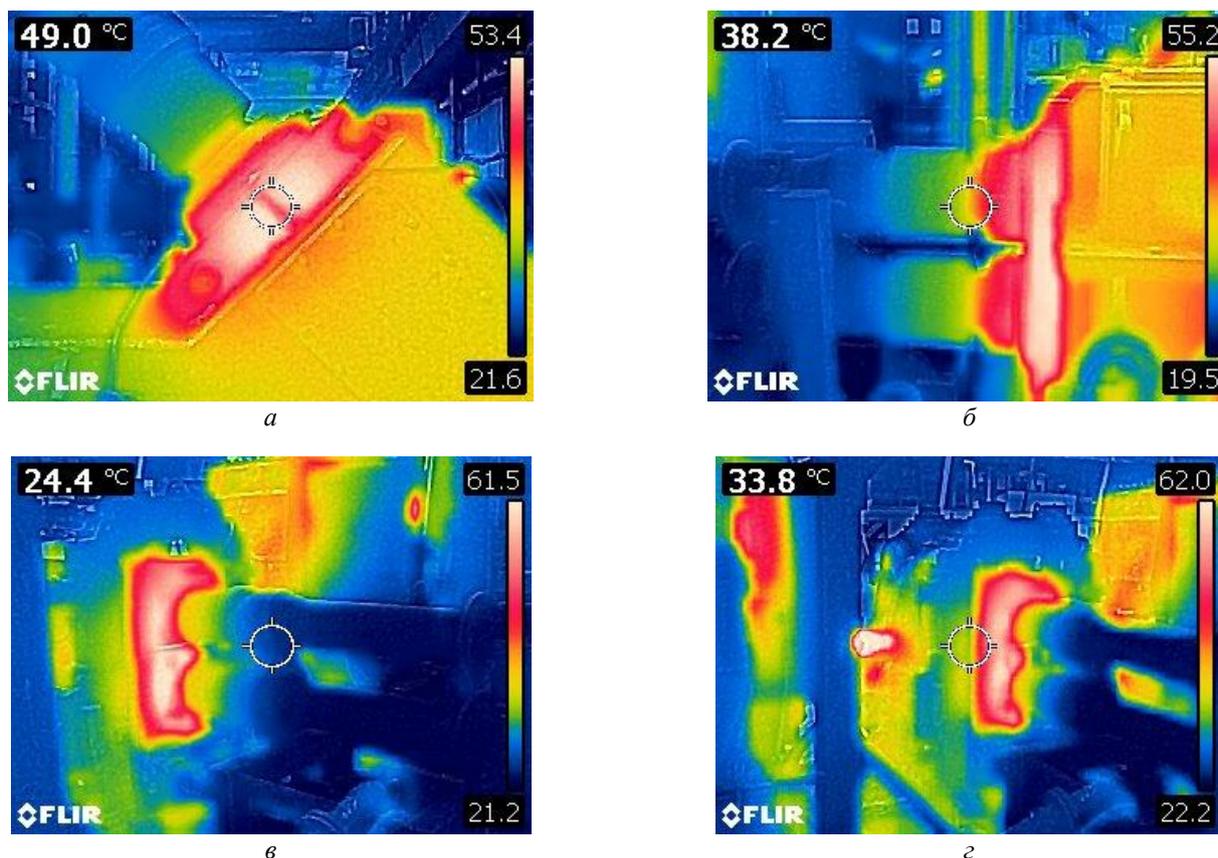


Рис. 9. Термограммы выходных валов редукторов привода прокатных валков:

a – подшипник выходного наклонного вала; *b* – подшипники выходного горизонтального вала, нагрев до 55 °С;
в, г – подшипники прокатной клетки

Fig. 9. Thermograms of output shafts of mill roll gearheads:

a – bearing of the output inclined shaft; *b* – bearings of output lay shaft, heating up to 55 °С;
c, d – rolling mill stand bearings

Значительный нагрев подшипниковых опор электродвигателей и редукторов может быть вызван несоответствием типа или уровня смазки, дисбалансом ротора, слишком плотной посадкой подшипника, вибрациями, неровностью поверхности опоры.

Среди диагностических параметров выделяются температура в локальных точках, интенсивность нарастания температуры при запуске, разность температур масла или жидкости на выходе и входе; наличие цветов каления и побежалости. Эффективным является сочетание субъективных и приборных методов.

Пирометры и тепловизоры представлены широким спектром моделей с разным техническим уровнем и с разными возможностями. При выборе подходящей модели прибора необходимо определиться, какие именно

задачи диагностики придется решать с его помощью. Выбор подходящей модели пирометра и/или тепловизора определяется следующими условиями: из каких материалов изготовлены диагностируемые объекты; возможный диапазон температур и размеры диагностируемых областей; расстояния, с которых будут проводиться измерения; температура окружающей среды; прозрачность пространства между прибором и объектом; требуемая точность измерений; скорость изменения положения или состояния диагностируемого объекта; необходимость интеграции прибора в компьютерную систему диагностики.

Формирование профессиональных компетенций в области термометрирования промышленных объектов. Для достоверного определения температуры поверхно-

стей элементов электромеханических систем необходимо хорошо понимать процесс формирования показаний температуры бесконтактными приборами термометрии и обязательно учитывать коэффициент теплового излучения материалов.

Подготовка специалиста базируется на знаниях основ тепловидения, обработки и интерпретации оперативных замеров температур тепловых полей диагностируемых объектов [23–26]. Типовая программа подготовки специалиста по термометрированию разработана с учетом существующих нормативных документов [21–34] и предлагает к изучению следующие вопросы:

– аксиомы работоспособности и диагностические параметры – факторы, определяющие работоспособное состояние и виды ремонтных воздействий;

– физические основы термометрии – требования к средствам измерения; основы инфракрасной термографии; активный и пассивный тепловой контроль; диагностические параметры при измерении температуры; дополнительное оснащение тепловизора; критерии выбора тепловизора для проведения различных работ в области теплового контроля; пирометры, тепловизоры – общее устройство;

– основные функциональные возможности тепловизоров – параметры тепловых изображений; выбор рабочей палитры тепловизора; температурный диапазон и поддиапазоны тепловизора; определение и настройка коэффициента излучения; настройка тепловизора перед началом работы; требования к уровням подготовки персонала; методика тепловизионного обследования; правила техники безопасности при работе с тепловизором; измерение тепловой картины объекта;

Библиографический список

1. Baranski M., Polak A. Thermal diagnostic in electrical machines. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 NR 10/2011.
2. Dukovska L., Petkov V., Mihailov Em., Vasileva S. Image Processing for Technological Diagnosis of Metallurgical Facilities. Cybernetics and Information Technologies, Vol. 12, No 4, 2012, pp. 66–76.

– методы оценки технического состояния – качественный и количественный анализ; основные регламентирующие документы; характерные неисправности и их обнаружение по термограммам; критерии дефектов тепловой группы; анализ результатов и составление протокола результатов измерений; компьютерные программы обработки термограмм.

Данная программа рассчитана на работу со слушателями в течение недели. После проведения практических занятий по измерению тепловых полей объектов следует экзамен, который подтверждает уровень закрепленных знаний и готовность к самостоятельной работе.

Выводы

1. Появление широкого спектра приборов тепловизионного контроля значительно расширяет возможности контроля технического состояния ЭМС по параметрам температуры. Визуализация тепловых полей позволяет эффективно решать задачи диагностирования электрической и механической части с учетом специфических условий преобразования электрической энергии в механическую и тепловую.

2. Использование динамических тепловых расчетных схем замещения двигателей рекомендуется на этапе предварительного контроля состояния электромеханической системы при введении в расчет типовых и экстремальных возмущений.

3. Разработаны рекомендации и программа для использования тепловизионной техники техническим персоналом промышленного предприятия с учетом комплексного подхода к изучению физики теплового проявления неисправностей электрического и механического оборудования.

3. Chou Y. and Yao L. Automatic Diagnostic System of Electrical Equipment Using Infrared Thermography, 2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition, Malacca, 2009, pp. 155–160.
4. Madding, Robert. Emissivity Measurement and Temperature Correction Accuracy Considerations, Infrared Training Center, 2002.
5. Neto E. T. W., Costa E. Da, Maia M. Influence of emissivity and distance in high voltage equipments thermal imaging, Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC'06. IEEE/PES, 2006, vol. 0, pp. 1–4.
6. PAJANI, Dominique. 10 mars 2013 Thermographie Principes et mesure. Dans: «Mesure de température», [en ligne], Éditions T.I. [Paris, France], 2017, r2740, [Consulté le 06/09/2017], TIB542DUO, [base de données en ligne], disponible à l'adresse: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesure-de-temperature-42542210/thermographie-r2740/>.
7. PAJANI, Dominique et AUDAIRE, Luc., 10 mars 2013, «Thermographie Technologies et applications». Dans: «Mesure de température», [en ligne], Éditions T.I. [Paris, France], 2017, r2741, [Consulté le 06/09/2017], TIB542DUO, [base de données en ligne], disponible à l'adresse : <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesure-de-temperature-42542210/thermographie-r2741/>.
8. Introduction aux plans d'expériences [Ressource électronique] / Jacques Goupy, Lee Creighton. 3e édition. Paris: Dunod : L'Usine nouvelle, 2006.
9. Introduction aux transferts thermiques : cours et exercices corrigés / Jean-Luc Battaglia, Andrzej Kusiak, Jean-Rodolphe Puiggali. Paris : Dunod, 2010.
10. Электромеханические системы автоматизации стационарных установок / Машиностроение и техносфера XXI века / Под общ. ред. В.Ф. Борисенко // Сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. в г. Севастополе 12–17 сентября 2005 г. Донецк: ДонНТУ, 2005. 281 с.
11. Чиликин М. Г., Сандлер А. С. Общий курс электропривода: учебник для вузов. М., 1981. 576 с.
12. Ключев В. И. Теория электропривода: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1985. 560 с.
13. Борисенко А. И., Костиков А. И., Яковлев А. И. Охлаждение промышленных электрических машин. М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
14. Беспалов В. Я., Мощинский Ю. А., Цуканов В. И. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя // Электричество. 2003. № 4. С. 20–26.
15. Беспалов В.Я., Дунайкина Е.А., Мощинский Ю.А. Нестационарные тепловые расчеты в электрических машинах / Под ред. Б.К. Клокова. М.: МЭИ, 1987. 72 с.
16. W.L. Chan, A.T.P. So, L.L. Lai, Three-dimensional thermal imaging for power equipment monitoring, IEE Proceedings, Generation, Transmission, and Distribution, Vol. 147, Issue 6 November 2000, pp. 355–360.
17. Pragasen Pillay. Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies. IEEE transactions on energy conversion, Vol. 21, No. 4, December 2006.
18. Vija Mehta, Sanket Pandya, Nirav Meghpara. Thermal network model of electrical motor by lumped heat method [Тепловая сетевая модель электродвигателя методом сосредоточенного нагрева]. IJEDR, Vol. 4, Issue 2, 2016.
19. Bouheraoua M., Zaouia M., Khaldi R., Benamrouche N. Experimental Study of Heating in Induction Motors for Several Load Conditions. (2019).
20. Ejiofor, Oti & Nnadi, Damian & Nwosu, Cajethan. Fundamentals of thermal modelling of induction machines. Int.conf. of electric power engineering (ICEPENG 2015), October 14–16, 2015.
21. РД 153-34.0-20.364–00. Методика инфракрасной диагностики тепломеханического оборудования.
22. ГОСТ 26629–85. Здания и сооружения. Метод тепловизионного контроля качества теплоизоляции ограждающих конструкций.
23. СНиП II-3–79. Строительные нормы и правила. Строительная теплотехника.
24. Яльшев Ф. Х. Оптические методы контроля зданий и сооружений. Контроль качества теплозащиты. Л.: Стройиздат. Ленингр. отд., 1988. 79 с.
25. МУ 34-70-184–87. Методические указания по испытанию тепловой изоляции оборудования и трубопроводов ТЭС. М.: Союзтехэнерго, 1988.
26. Эксплуатационный циркуляр Ц-01-94 (Т) от 06.05.1994 г. Организация контроля за состоянием и ремонт обмуровки и тепловой изоляции оборудования тепловых электростанций в целях снижения потерь тепла и температур поверхности до нормальных значений.
27. ОСТ 34 26.446–88. Обмуровка паровых и водогрейных стационарных котлов. Общие технические требования. М.: Информэнерго, 1989. 14 с.
28. Методика обследования дымовых труб тепловых электростанций визуальным способом и при помощи тепловизора (Отчет по договору 96-137-901-025, 1-й кв. 1996 г.). М.: ОРГРЭС, ПЛИТ, 1996.

29. Экспериментальные работы на действующей дымовой трубе по определению тепловых потерь при эксплуатационных режимах (Отчет по договору 96-162-900-025, 2-й кв. 1996 г.) М.: ОРГРЭС. ПЛИТ, 1996.

30. Методические указания по определению состояния тепловых сетей подземной прокладки по известной температуре поверхности грунта над теплотрассой. Разработано Firmой ОРГРЭС (Александров А. Н.) и Донской акционерной компанией (Иванов В.В., Бабенков В.И., Дунин И.Л.). М.: ОРГРЭС, 1991.

31. РД 34.20.501–95. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. 15-е изд. – М.: ОРГРЭС, 1996.

32. Афонин А. В., Поляков В. С. и др. Инфракрасная термография в энергетике, Т. 1. Основы инфракрасной термографии. СПб.: Изд. ПЭИПК, 2000.

33. Госсорг Ж. Инфракрасная термография. М.: Мир, 1988.

34. Бажанов С. А. Инфракрасная диагностика электрооборудования распределительных устройств. Библиотечка электротехника, прил. к журналу «Энергетик». М., 2000.

References

1. Baranski M., Polak A. Thermal diagnostic in electrical machines. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 NR 10/2011.

2. Dukovska L., Petkov V., Mihailov Em., Vasileva S. Image Processing for Technological Diagnosis of Metallurgical Facilities. Cybernetics and Information Technologies, Vol. 12, No 4, 2012, pp. 66–76.

3. Chou Y. and Yao L. Automatic Diagnostic System of Electrical Equipment Using Infrared Thermography, 2009 International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition, Malacca, 2009, pp. 155–160.

4. Madding Robert. Emissivity Measurement and Temperature Correction Accuracy Considerations, Infrared Training Center, 2002.

5. Neto E. T. W., Costa E. Da, e Maia M., *Influence of emissivity and distance in high voltage equipments thermal imaging*, Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006. TDC'06.IEEE/PES, 2006, vol. 0, pag. 1–4.

6. PAJANI, Dominique. 10 mars 2013, «Thermographie Principes et mesure». Dans: «Mesure de température», [en ligne], Éditions T. I. [Paris, France], 2017, r2740, [Consulté le 06/09/2017], TIB542DUO, [base de données en ligne], disponible à l'adresse: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesure-de-temperature-42542210/thermographie-r2740/>.

7. PAJANI, Dominique et AUDAIRE, Luc., 10 mars 2013, Thermographie Technologies et applications. Dans: «Mesure de température», [en ligne], Éditions T.I. [Paris, France], 2017, r2741, [Consulté le 06/09/2017], TIB542DUO, [base de données en ligne], disponible à l'adresse: <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesure-de-temperature-42542210/thermographie-r2741/>.

8. Introduction aux plans d'expériences [Ressource électronique] / Jacques Goupy, Lee Creighton. - 3e édition. Paris, Dunod: L'Usine nouvelle, 2006.

9. Introduction aux transferts thermiques : cours et exercices corrigés / Jean-Luc Battaglia, Andrzej Kusiak, Jean-Rodolphe Puiggali. Paris: Dunod, 2010.

10. Electromechanical automation systems for stationary installations / Engineering and technosphere of the XXI century / under general editorship of V.F. Borisenko // Proceedings of international scientific and technical conference, Sevastopol, September 12-17, 2005; Donetsk: DonNTU Publ., 2005, 281 p. (in Russ.).

11. Chilikin M.G., Sandler A.S. Electric drive course of studies: textbook for universities and colleges (*Obshchiy kurs elektroprivoda: uchebnik dlya vuzov*). Moscow, 1981, 576 p. (in Russ.).

12. Klyuchev V.I. Theory of electric drive: Textbook for universities and colleges (*Teoriya elektroprivoda: Uchebnik dlya vuzov*). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1985, 560 p. (in Russ.).

13. Borisenko A.I., Kostikov A.I., Yakovlev A.I. Cooling of industrial electric machines (*Okhlazhdenie promyshlennykh elektricheskikh mashin*). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1983, 296 p. (in Russ.).

14. Bespalov V.Ya., Moshchinsky Yu.A., Tsukanov V.I. Simplified mathematical model of nonstationary heating and cooling of induction motor stator winding// Electricity (*Elektrichestvo*), 2003, No. 4, pp. 20–26 (in Russ.).

15. Bespalov V.Ya., Dunaikina EA, Moshchinsky Yu.A. Nonstationary Thermal Design Calculations for Electric Machines (*Nestatsionarnye teplovye raschety v elektricheskikh mashinakh*) / Edited by B. K. Klovkov. Moscow: MEI, 1987, 72 p. (in Russ.).

16. Chan W. L., So A. T. P., Lai L. L. Three-dimensional thermal imaging for power equipment monitoring, IEE Proceedings, Generation, Transmission, and Distribution, Vol. 147, Iss. 6, November 2000, pp. 355–360.

17. Pragasen Pillay. Loss of life in induction machines operating with unbalanced supplies. IEEE transactions on energy conversion, Vol. 21, No. 4, December 2006.
18. Mehta Vija, Pandya Sanket, Meghpara Nirav. Thermal network model of electrical motor by lumped heat method. IJEDR, Vol. 4, Issue 2, 2016.
19. Bouheraoua M., Zaouia M., Khaldi R., Benamrouche N. Experimental Study of Heating in Induction Motors for Several Load Conditions. (2019).
20. Ejiofor, Oti&Nnadi, Damian &Nwosu, Cajethan. (2015). FUNDAMENTALS OF THERMAL MODELING OF INDUCTION MACHINES. International conference of electric power engineering (ICEPENG 2015), October 14–16, 2015.
21. RD (Standard Operation Procedure) 153-34.0-20.364–00. Technique of infrared diagnostics of thermomechanical equipment (in Russ.).
22. State Standard GOST 26629–85. Buildings and structures. Method of thermal imaging quality control for thermal insulation of building envelopes (in Russ.).
23. SNiP II-3–79. Constructions Codes and Regulations. Construction heat engineering (in Russ.).
24. Yalyshev F. Kh. Optical methods for monitoring buildings and structures. Thermal protection system quality control (*Opticheskie metody kontrolya zdaniy i sooruzheniy. Kontrol' kachestva teplozashchity*). Leningrad: Stroyizdat Publ., Leningrad Branch, 1988, 79 p. (in Russ.).
25. MU 34-70-184–87. Procedural guidelines for testing thermal insulation of equipment and pipelines of thermal power plants. Moscow: Soyuztekhnenergo Publ., 1988 (in Russ.).
26. Operational circular order Ts-01-94 (T) dated 05.06.1994. Organization of control over the condition and repair of lining and thermal insulation of equipment of thermal power plants for reducing heat losses and decreasing surface temperatures to normal level (in Russ.).
27. Sectoral Standard OST 34 26.446–88. Lining of steam and hot-water stationary boilers. General technical requirements. Moscow: Informenergo Publ., 1989, 14 p. (in Russ.).
28. Method of visual inspection of thermal power plant chimneys using thermal imager (Report under Contract 96-137-901-025, 1st quarter of 1996). Moscow: ORGRES, PLIT, 1996 (in Russ.).
29. Experimental work on the operating chimney to determine heat losses under operational conditions (Report under Contract 96-162-900-025, 2nd quarter of 1996). Moscow: ORGRES, PLIT, 1996 (in Russ.).
30. Guidelines for determining the state of underground heating networks using known temperature of the soil surface above the heating pipes. Developed by the ORGRES Firm (Alexandrov A. N.) and the Donskaya Joint-Stock Company (Ivanov V. V., Babenkov V. I., Dunin I. L.), Moscow: ORGRES, 1991 (in Russ.).
31. RD (Standard Operation Procedure) 34.20.501–95. Rules for maintenance of power plants and networks of the Russian Federation, 15th ed. M.: ORGRES, 1996 (in Russ.).
32. Afonin A. V., Polyakov V. S. et al. Infrared thermography in energy engineering, v. 1. Fundamentals of infrared thermography (*Infrakrasnaya termografiya v energetike. Osnovy infrakrasnoy termografii*). SPb.: PEIPK Publ., 2000 (in Russ.).
33. Gossorg Zh. Infrared Thermography (*Infrakrasnaya termografiya*). Moscow: Mir Publ., 1988 (in Russ.).
34. Bazhanov S. A. Infrared diagnostics of electrical equipment of electricity distribution plants. Library of Electrical Engineer, Appendix to Power Engineer journal (*Energetik*). Moscow, 2000 (in Russ.).

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-202-212

**Особенности механизма формирования нагрузки
на систему «крепь-межрамное ограждение»**

Петренко Ю. А., Касьян Н. Н., Касьяненко А. Л.

Донецкий национальный технический университет, Донецк, ✉kasyanenkoal@aol.com

Аннотация: Исследованы особенности формирования нагрузки на систему «крепь – межрамное ограждение» в процессе формирования вокруг выработки зоны разрушенных пород путем лабораторных исследований на моделях из эквивалентных материалов и структурных моделях. Выявлена роль межрамного ограждения при формировании нагрузки на рамные крепи. Установлено, что над межрамными ограждениями внутри зоны разрушенных пород образуется свод естественного равновесия, который перераспределяет нагрузку на рамы крепи, а на межрамные ограждения оказывает давление вес пород внутри этого свода. Разработаны требования к межрамным ограждениям рамных крепей горных выработок.

Ключевые слова: межрамные ограждения, затяжка, жесткость, рамная крепь, нагрузка на крепь, горное давление, эквивалентные материалы, структурные модели.

Для цитирования: Петренко Ю. А., Касьян Н. Н., Касьяненко А. Л. Особенности механизма формирования нагрузки на систему «крепь-межрамное ограждение». *Горные науки и технологии*. 2019;4(3):202-212. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-202-212.

Features of Origination of Load on "Support-Interframe Shield" System

Y. A. Petrenko, N. N. Kasyan, A. L. Kasyanenko

Donetsk National Technical University, Donetsk, ✉kasyanenkoal@aol.com

Abstract: The features of originating load on “support-interframe shield” system in the process of formation of broken rock zone around a mine working were investigated by laboratory tests on models of equivalent materials and structural models. The role of interframe shield in the formation of frame support load has been revealed. It was found that a natural self-supporting arch is formed over interframe shields within the broken rock zone, which redistributes the load on the roof support frames, while the weight of rocks within the arch puts pressure on the interframe shields. The requirements for interframe shield of frame supports in mine workings have been developed.

Keywords: interframe shield, lagging, rigidity, frame support, support load, rock pressure, equivalent materials, structural models.

For citation: Petrenko Y. A., Kasyan N. N., Kasyanenko A. L. Features of origination of load on "support-interframe shield" system. *Mining Science and Technology*. 2019;4(3):202-212 (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-202-212.

Постановка проблемы. С ростом глубины разработки одной из наиболее актуальных проблем стало поддержание горных выработок в процессе эксплуатации. Попытки обеспечить безремонтное поддержание выработок за счет увеличения несущей способности крепи положительных результатов не дали. В настоящее время удельный объем перекрепления выработок на шахтах Донбасса

достиг 7,5 м на 1 000 т добычи, а затраты труда на ремонт и поддержание выработок – 565,2 чел./см на 1 км поддерживаемых выработок в год, или около 50 чел./см на 1 000 т добычи. Стоимость же крепления одного метра выработки составляет до 50–60 % от стоимости ее проведения. Состояние выработок на шахтах Донбасса характеризуется следующими цифрами: всего деформировано



50 % выработок, в том числе подготовительных горизонтальных – 64 %, наклонных – 52 %, выработок околоствольных дворов – 43 %. Из общего объема деформированных выработок 20 % находятся в аварийном состоянии, это приводит не только к увеличению стоимости поддержания выработок, но и существенно влияет на безопасность ведения горных работ.

В связи с этим совершенствование конструкций крепи горных выработок на основе установленных особенностей механизма формирования нагрузки на них является актуальной задачей.

Результаты анализа последних исследований и публикаций. Механизм взаимодействий рамной крепи выработок с окружающим горным массивом является весьма сложным и неоднозначным. Существующее представление о том, что отпор крепи распределяется по внутренней поверхности выработки на ширину, равную шагу установки крепи, не отражает фактически наблюдаемую ситуацию в шахтных условиях, особенно при образовании зоны разрушенных пород. Практически отпор массиву крепью осуществляется только по поверхности контакта между ними. В межрамном пространстве величина отпора массиву определяется шагом установки крепи и жесткостью межрамного ограждения. При этом несущим элементом, оказывающим сопротивление смещающимся породам, являются только рамы крепи.

Характер распределения нагрузки по периметру рамной крепи в настоящее время изучен достаточно глубоко [1–7]. Вместе с тем крепь представляет собой пространственную конструкцию, и вопрос о механизме взаимодействия рамной крепи с вмещающим породным массивом с учетом влияния на него характера деформирования пород в межрамном пространстве до настоящего момента полностью не изучен. Большинство исследователей затяжка (межрамное ограждение) рассматривается как элемент крепи, предназначенный для защиты выработки от вывалов

породы в промежутках между рамами крепи [8–16]. Вместе с тем результаты обследования горных выработок показывают, что состояние затяжки намного хуже состояния непосредственно рам крепи [17–20]. Поэтому в последние годы большее внимание стали уделять и грузонесущей функции затяжки, которая заключается в восприятии давления со стороны массива горных пород и передачи его на рамы крепи [21–25]. При этом большинство разработанных шахтных затяжек представляют собой жесткие конструкции, несущая способность которых приближается к несущей способности крепежных рам. Это приводит к увеличению материалоемкости и трудоемкости крепления выработок. Такой подход к решению проблемы межрамных ограждений не отражает реального механизма работы рамной податливой крепи.

Цель работы. Установить особенности формирования нагрузки на систему «крепь – межрамное ограждение» в процессе формирования вокруг выработки зоны разрушенных пород с учетом взаимодействия рам крепи с породным массивом.

Результаты исследований. Для достижения поставленной цели в работе использовался метод физического моделирования на моделях из эквивалентных материалов и структурных моделях. Решение осуществлялось в несколько этапов.

1. Установить влияние режима работы затяжки (жесткой или податливой) и плотности крепления на величину и характер нагружения рам крепи.

2. Установить особенности механизма нагружения рам крепи и затяжки при податливом режиме ее работы.

3. Обосновать требования к параметрам податливой затяжки.

Нагрузка модели осуществлялась при помощи пневмобаллонов. В качестве эквивалентного материала при моделировании использовались гипсопесчаные смеси.

При отработке структурных моделей в качестве материала моделей использовалась

мраморная крошка с размером частиц до 10 мм.

Моделировался слоистый горный массив с прочностью пород на одноосное сжатие 40–60 МПа. В моделях рамы крепи по длине выработки устанавливались с шагом 60; 40; 20 и 13 мм, что соответствует 1,5; 1,0; 0,5 и 0,33 м в натуре. Для изучения характера распределения напряжений в массиве горных пород в моделях на расстоянии 30 и 70 мм от контура выработки всплошную устанавливались датчики трения. Аналогичные датчики устанавливались и под рамы крепи.

Схема расположения датчиков приведена на рис. 1. Перед отработкой моделей снимались показания датчиков при отсутствии внешней нагрузки. В дальнейшем в процессе отработки моделей снимались показания датчиков при изменении величины внешней нагрузки.

Вначале была отработана модель № 1 с жесткой затяжкой. Результаты измерений давления на рамы крепи и напряжений в окружающем массиве представлены на рис. 2, 3. Анализ результатов измерения давления на рамы крепи (см. рис. 2) показы-

вает, что с увеличением плотности установки крепи нагрузка на раму уменьшается. При этом показания датчиков под рамами № 1 и 12 не учитывались, так как они располагались вплотную к телу модели.

Так, с уменьшением шага установки крепи с 1,5 до 0,33 м нагрузка на раму уменьшается с 121 до 42 кПа. Это подтверждает правильность существующего мнения о том, что участие жесткой затяжки в формировании нагрузки на крепь сводится только к ее перераспределению на рамы в зависимости от шага их установки.

Анализ графиков характера распределения давления в массиве модели (см. рис. 3) показывает, что он также зависит от плотности установки рам крепи. Так, при шаге установки крепи 1,5–0,5 м непосредственно над рамами наблюдается максимальное давление, при этом с уменьшением шага крепи разница между давлением над рамами крепи и между ними снижается. При шаге менее 0,5 м давление в массиве распределяется более равномерно. Такая же закономерность наблюдается и при большем удалении от контура выработки.

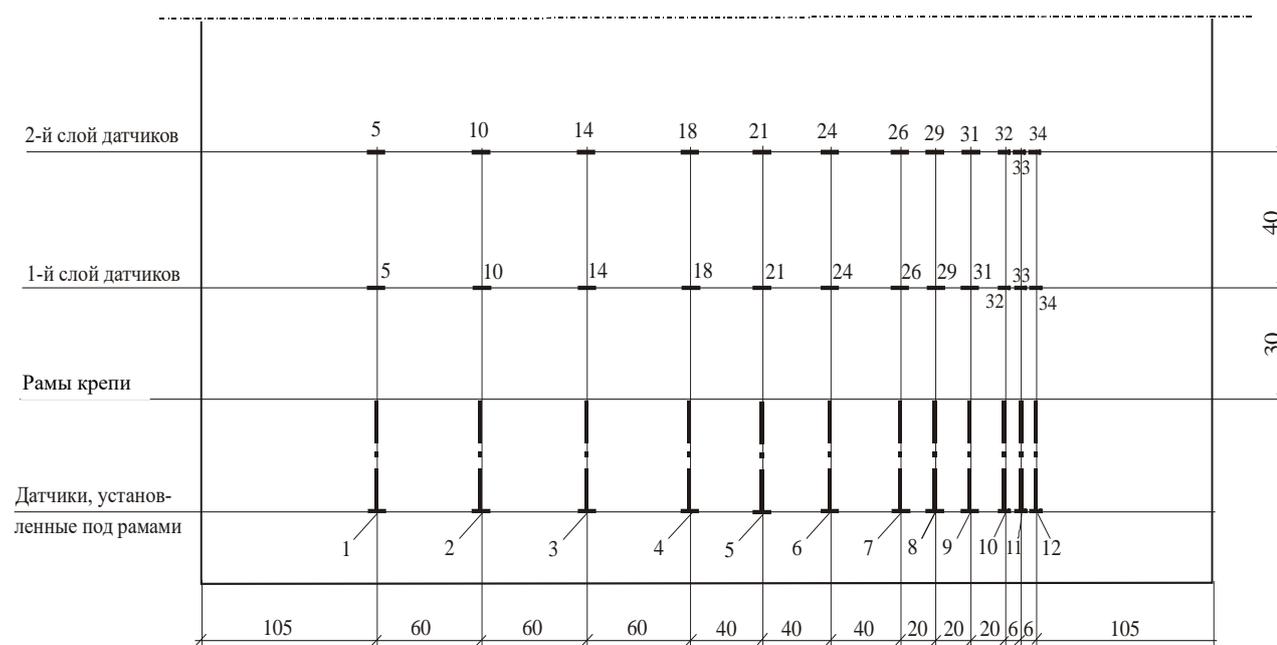


Рис. 1. Схема расположения датчиков давления в модели

Fig. 1. Layout of pressure sensors in the model

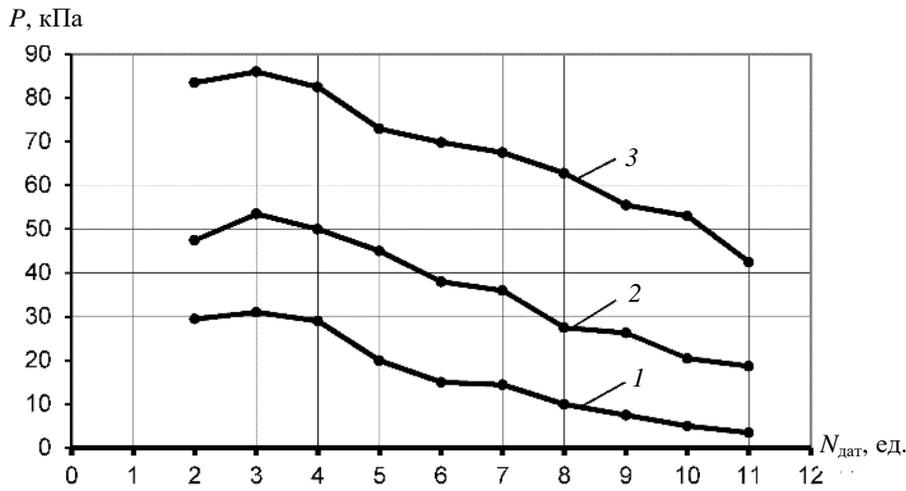


Рис. 2. Результаты измерения давления на рамы крепи (P) при жесткой затяжке и величине внешней нагрузки 0 кПа (1), 20 кПа (2) и 40 кПа (3)

Fig. 2. Results of measuring pressure on support frames (P) with rigid lagging at external load of 0 kPa (1), 20 kPa (2) and 40 kPa (3)

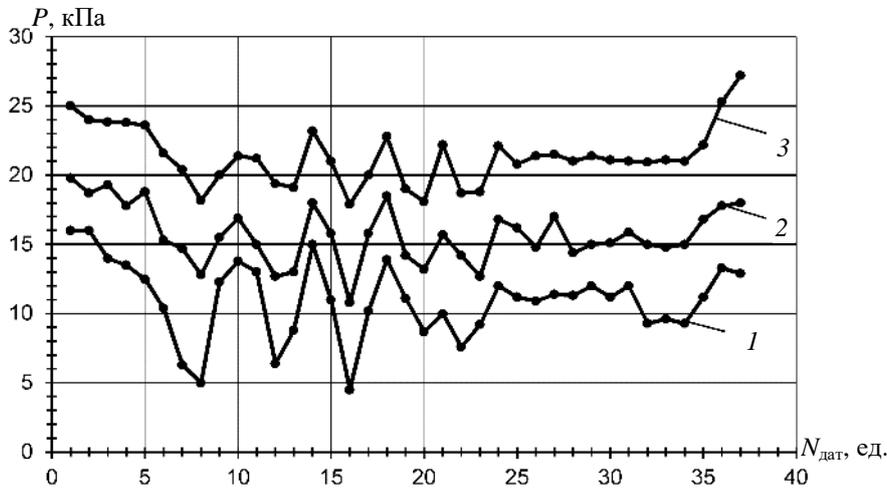


Рис. 3. Результаты измерения давления (P) на датчики первого слоя в модели с жесткой затяжкой при величине нагрузки 0 кПа (1), 20 кПа (2) и 40 кПа (3)

Fig. 3. Results of measuring pressure on the first layer sensors in the model with rigid lagging at external load of 0 kPa (1), 20 kPa (2) and 40 kPa (3)

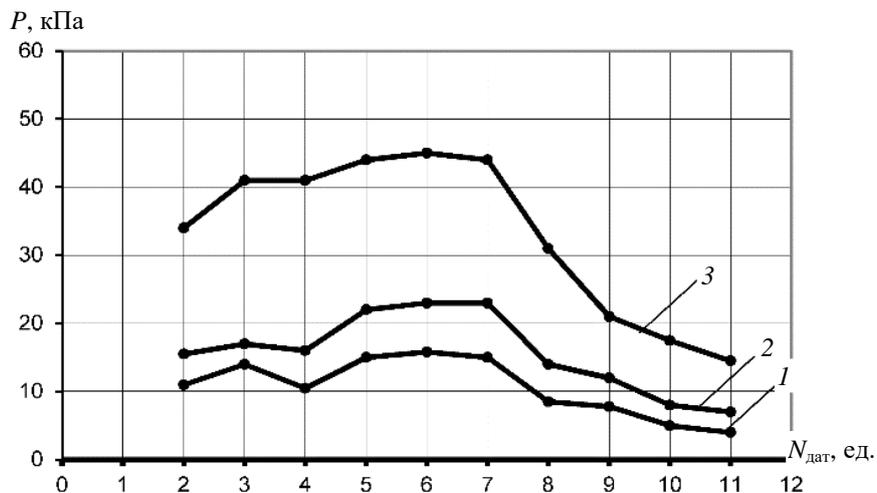


Рис. 4. Результаты измерения давления на рамы крепи (P) с податливой затяжкой при величине нагрузки 0 кПа (1), 20 кПа (2) и 40 кПа (3)

Fig. 4. Results of measuring pressure on support frames (P) with adjustable lagging at external load of 0 kPa (1), 20 kPa (2) and 40 kPa (3)

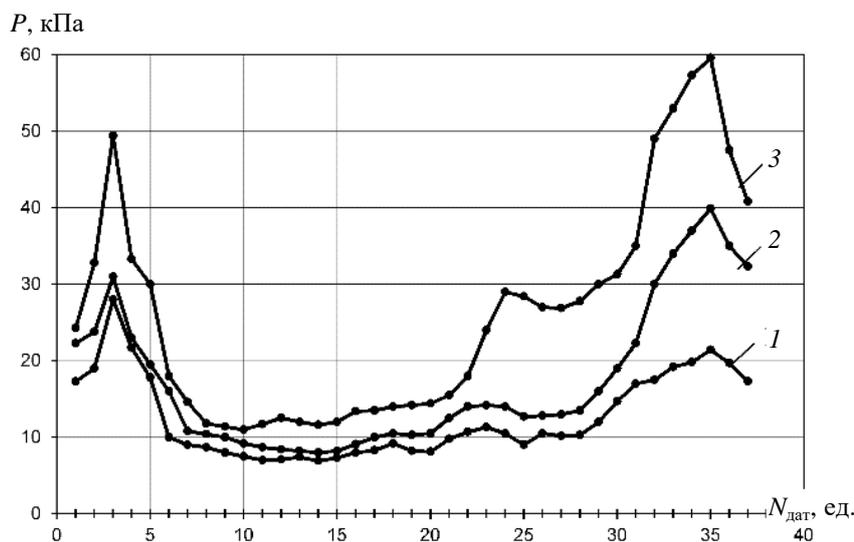


Рис. 5. Результаты измерения давления (P) на датчики первого слоя в модели с податливой затяжкой при величине нагрузки 0 кПа (1), 20 кПа (2) и 40 кПа (3)

Fig. 5. Results of measuring pressure on the first layer sensors in the model with adjustable lagging at external load of 0 kPa (1), 20 kPa (2) and 40 kPa (3)

Очевидно, что рамы крепи выступают в роли концентраторов давления, так как их несущая способность и жесткость значительно больше, чем у затяжки. Вследствие этого массив непосредственно над рамами разрушается сильнее. При шаге крепи менее 0,5 м несущая способность и жесткость крепления по длине выработки практически одинаковы и давление распределяется более равномерно по длине выработки. Следовательно, увеличение жесткости затяжки приведет к более интенсивному разрушению пород между рамами.

Модель № 2 была отработана для аналогичных условий, но с податливой затяжкой. Результаты измерений давления на рамы крепи и напряжений в окружающем массиве представлены на рис. 4, 5. Как видно из приведенных данных, нагрузка на рамы крепи при шаге их установки от 0,5 м до 1,5 м распределяется равномерно и практически не зависит от расстояния между рамами. При шаге установки крепи 0,5 м и менее нагрузка на рамы распределяется аналогично, как и при жесткой затяжке, т.е. с уменьшением расстояния между рамами нагрузка уменьшается.

Распределение давлений в глубине массива носит равномерный характер при шаге крепи 0,5–1,5 м, при этом концентрации давления над рамами крепи не наблюдается. При шаге крепи менее 0,5 м давление в глубине массива распределяется аналогично, как и при жесткой затяжке.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что при шаге установки рам крепи более 0,5 м затяжка не только ограждает выработку от возможных обрушений, но и участвует в процессе формирования нагрузки на рамы крепи. При этом чем больше податливость затяжки, тем более равномерно распределяется давление на рамы и в глубине массива по длине выработки.

При шаге установки крепи менее 0,5 м роль затяжки сводится только к удержанию забутовочного материала.

Для более детального изучения механизма формирования нагрузки на рамы крепи были отработаны модели № 3, 4, 5. Для моделирования зоны разрушенных пород (ЗРП) в качестве материала модели использовалась мраморная крошка с крупностью частиц до 10 мм. В модели рамы крепи по длине выработки устанавливались через 40 мм, что соответственно шагу крепи в натуре 1,0 м. Под

каждой рамой крепи устанавливался датчик трения. Между рамами крепи 1–4 устанавливалась податливая затяжка, а между рамами 4–7 – жесткая. В моделях № 3, 4 и 5 имитировалась величина зоны разрушенных пород над выработкой, равная соответственно половине шага установки крепи, шагу установки крепи и двум шагам установки крепи.

Результаты измерений давлений на рамы крепи в моделях 3, 4 и 5 представлены соответственно на рис. 6, 7.

Анализ полученных данных показал, что в начальной стадии формирования зоны разрушенных пород (при величине внешней нагрузки 0...10 кПа), податливость затяжки не оказывает существенного влияния на величину нагрузки на крепь. Начиная с величины внешней нагрузки в 10 кПа нагрузка на рамы с податливой затяжкой растет менее интенсивно и по величине в 1,5...2,5 раза

меньше, чем на рамы с жесткой затяжкой. При увеличении внешней нагрузки более 30 кПа интенсивность нагружения рам с податливой затяжкой возрастает, а с жесткой – уменьшается. Но в целом нагрузка на рамы с податливой затяжкой, как и было установлено ранее, на 30...40 % меньше, чем на рамы с жесткой затяжкой.

Такой механизм формирования нагрузки на рамы крепи можно объяснить следующим. Начиная с величины внешней нагрузки в 10 кПа податливая затяжка прогибается и при размере зоны разрушенных пород над выработкой более половины шага крепи между рамами образуется свод естественного равновесия. Свод полностью формируется при величине внешней нагрузки 30 кПа (рис. 8). После этого нагрузка на рамы крепи начинает возрастать с увеличением внешней нагрузки более интенсивно.

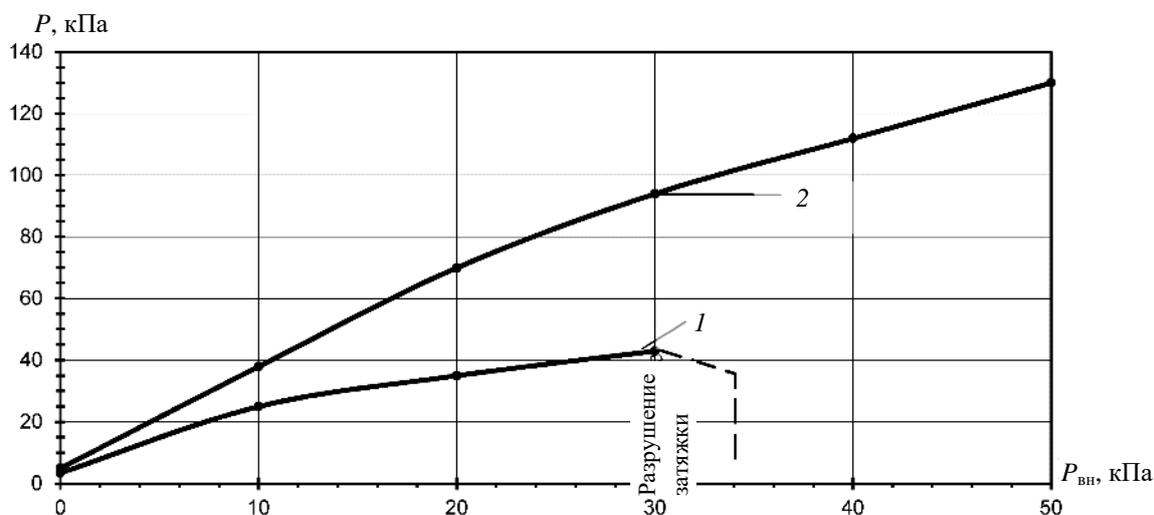


Рис. 6. Результаты измерения давления на рамы крепи (P) в модели № 3 в зависимости от величины внешней нагрузки ($P_{вн}$):

1 – при податливой затяжке; 2 – при жесткой затяжке

Fig. 6. Results of measuring pressure on support frames (P) in model No. 3 depending on external load (P_{ext}):

1 – with adjustable lagging; 2 – with rigid lagging

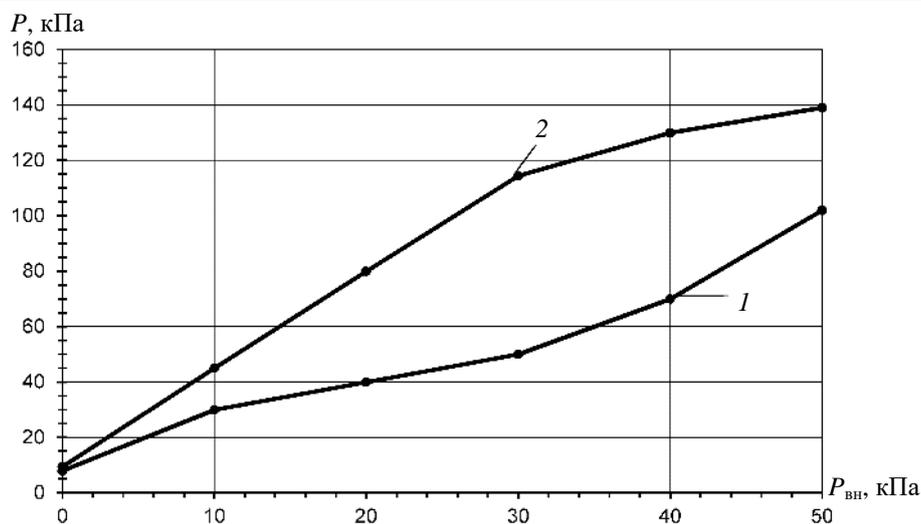


Рис. 7. Результаты измерения давления на рамы крепи (P) в модели № 4, 5 в зависимости от величины внешней нагрузки ($P_{вн}$):

1 – при податливой затяжке; 2 – при жесткой затяжке

Fig. 7. Results of measuring pressure on support frames (P) in models Nos. 4, 5 depending on external load (P_{ext}):

1 – with adjustable lagging; 2 – with rigid lagging



Рис. 8. Состояние модели с жесткой и податливой затяжкой

Fig. 8. Behavior of model with rigid and adjustable lagging

Нагрузка на рамы с жесткой затяжкой с увеличением величины внешней нагрузки возрастает практически по линейной зависимости, так как затяжка только перераспределяет нагрузку на рамы. Однако при внешней нагрузке более 30 кПа затяжка прогибается и воспринимает часть смещений контура выра-

ботки и тем самым снижает нагрузку на рамы. После завершения образования в межрамном пространстве сводов естественного равновесия затяжка воспринимает нагрузку только от веса породы внутри этого свода. А так как эти своды опираются на рамы крепи, то при дальнейшем росте зоны разрушен-

ных пород вокруг выработки нагрузка ими перераспределяется только на рамы крепи и не передается на затяжку.

Выполненные исследования позволяют уточнить механизм формирования нагрузки на систему «крепь – межрамное ограждение» в процессе образования вокруг выработки зоны разрушенных пород, который заключается в следующем.

В начальный период формирования вокруг выработки ЗРП (размер ЗРП не превышает шага установки крепи) и при отсутствии деформации затяжки последняя только перераспределяет нагрузку от смещений контура выработки на рамы крепи, не оказывая существенного влияния на ее величину. При дальнейшем росте ЗРП вглубь массива и прогибе затяжки вследствие смещений пород в полость выработки, так как ее жесткость и несущая способность меньше, чем у рамы крепи, между рамами вдоль продольной оси выработки начинают образовываться своды естественного равновесия.

Образование свода естественного равновесия между рамами крепи вдоль выработки позволяет объяснить тот факт, что в шахтных условиях, даже при значительных деформациях податливой крепи с железобетонной затяжкой, не наблюдается полного разрушения затяжки и обрушения пород между рамами крепи. При этом несущая способность затяжки значительно меньше, чем рамы крепи.

Установленный механизм позволяет сформулировать требования к параметрам межрамного ограждения:

- податливость затяжки должна обеспечивать возможность образования сводов естественного равновесия внутри ЗРП в межрамном пространстве без ее разрушения;
- несущая способность затяжки должна приниматься такой, чтобы воспринимать нагрузку от веса пород в пределах свода естественного равновесия.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Обобщая результаты проведенных исследований, можно отметить следующее:

- затяжка, как жесткая, так и податливая, участвует в процессе формирования нагрузки на крепь при шаге установки рам крепи 0,5 м и более. При шаге установки рам крепи менее 0,5 м роль затяжки сводится только к удержанию забутовочного материала;

- при жесткой затяжке нагрузка на рамы крепи уменьшается с увеличением плотности установки рам, т.е. жесткая затяжка только перераспределяет нагрузку от смещений контура на рамы крепи. При этом над рамами наблюдается концентрация давления и более интенсивное разрушение массива;

- при податливой затяжке нагрузка на рамы крепи при шаге их установки более 0,5 м и давление в глубине массива распределяются равномерно и существенно не зависят от расстояния между рамами. При шаге установки рам крепи менее 0,5 м нагрузка на рамы и давление в глубине массива распределяются аналогично, как и при жесткой затяжке;

- при податливой затяжке по мере роста зоны разрушенных пород вокруг выработки вглубь массива и прогиба затяжки между рамами крепи вдоль выработки образуется свод естественного равновесия. При этом после завершения формирования свода естественного равновесия нагрузка на рамы крепи с увеличением внешнего давления возрастает более интенсивно;

- при податливой затяжке и шаге установки рам крепи более 0,5 м нагрузка на рамы на 30...40 % меньше, чем при жесткой затяжке.

Задачей дальнейших исследований является разработка методики расчета параметров межрамных ограждений.

Библиографический список

1. Литвинский Г. Г. Закономерности формирования нагрузки на крепи горных выработок // Сб. науч. тр. ДонГТУ. 2016. № 3 (46). С. 5–15.
2. Петренко Ю. А., Новиков А. О., Подкопаев С. В., Александров С. Н. Об особенностях формирования нагрузки на крепь выработок глубоких шахт. Физико-технические проблемы горного производства. 2011. Вып. 14. С. 133–141.
3. Li C. Rock support design based on the concept of pressure arch // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2006. Vol. 43(7). Pp. 1083–1090. doi: 10.1016/j.ijrmms.2006.02.007.
4. Дрибан В. А., Новиков А. О. О механизме потери устойчивости горных выработок и способах управления состоянием вмещающего их массива // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. 2012. № 11. С. 275–292.
5. Kong X., Liu Q., Pan Y., Liu J. Stress redistribution and formation of the pressure arch above underground excavation in rock mass // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2017. doi: 10.1080/19648189.2018.1541824.
6. Huang X., Zhang Z. Stress arch bunch and its formation mechanism in blocky stratified rock masses. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2012. Vol. 4. No. 1. Pp. 19–27. doi: 10.3724/SP.J.1235.2012.00019.
7. Касьян Н. Н., Новиков А. О., Петренко Ю. А., Шестоपालов И. Н., Резник А. В. Металлическая податливая крепь. Патент Украина, № a201102997, 2013.
8. Скобенко А. В., Хозяйкина Н. В., Дерыш В. В. Совершенствование рамной крепи протяженных выработок угольных шахт. Днепропетровск: НГУ, 2014. 96 с.
9. Lisjak A., Grasselli G. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2014. Vol. 6. No. 4. Pp. 301–314. doi: 10.1016/j.jrmge.2013.12.007.
10. Мещанинов С. К. Методы моделирования и управления надежностью функционирования горных выработок. Днепропетровск: НГУ, 2011. 360 с.
11. Alshkane Y. M., Marshall A. M., Stace L. R. Prediction of strength and deformability of an interlocked blocky rock mass using UDEC // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9. No. 3. Pp. 531–42. doi: 10.1016/j.jrmge.2017.01.002.
12. Bidgoli M. N., Zhao Z., Jing L. Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2013. Vol. 5. No. 6. Pp. 419–430. doi: 10.1016/j.jrmge.2013.09.002.
13. Kazerani T. Effect of micromechanical parameters of microstructure on compressive and tensile failure process of rock // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013 Vol. 64. Pp. 44–55. doi: 10.1016/j.ijrmms.2013.08.016.
14. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2013. Vol. 60. Pp. 345–352. doi: 10.1016/j.ijrmms.2013.01.011.
15. Wang X., Zhao Y., Lin X. Determination of mechanical parameters for jointed rock masses. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2011. Vol. 3, sup. 1. Pp. 398–406. doi: 10.3724/SP.J.1235.2011.00398.
16. Макшанкин Д. Н. Обоснование крепления горных выработок металлической крепью из шахтного профиля. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2012. 19 с.
17. Демин В. Ф., Демина Т. В., Алиев С. Б., Разумняк Н. Л. Исследование проявлений горного давления и характера взаимодействия различных видов крепления с вмещающими породами вокруг выработки. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2012. Отд. вып. № 7. С. 34–43.
18. Zhang L. Evaluation of rock mass deformability using empirical methods // Underground Space. 2017. Vol. 2. No. 1. Pp. 1–15. doi: 10.1016/j.undsp.2017.03.003.
19. Литвинский Г. Г., Смекалин Е. С. Эффективность рамных конструкций крепи // Сб. науч. тр. ДонГТУ. 2015. № 1 (44). С. 18–25.
20. Кошелев К. В., Петренко Ю. А., Новиков А. О. Охрана и ремонт горных выработок. М.: Недра, 1990. 218 с.
21. Петренко Ю. А. Геомеханические основы сохранения устойчивости выработок глубоких шахт на различных этапах их эксплуатации. Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Донецк, 2008. 30 с.
22. Bidgoli M. N., Jing L. Anisotropy of strength and deformability of fractured rocks // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2014. Vol. 6. No. 2. Pp. 156–164. doi: 10.1016/j.jrmge.2014.01.009.

23. Saeidi O., Rasouli V., Vaneghi R.G., Gholami R., Torabi S.R. A modified failure criterion for transversely isotropic rocks // *Geoscience Frontiers*. 2013. Vol. 5. No. 2. Pp. 215–225. doi: 10.1016/j.gsf.2013.05.005.
24. Ciz R., Siggins A.F., Gurevich B., Dvorkin J. Influence of microheterogeneity on effective stress law for elastic properties of rocks // *Geophysics*. 2008. Vol. 73 (1). Pp. E7–E14. doi: 10.1190/1.2816667.
25. Li Q., Shi W., Yang R. Deformation mechanisms in a coal mine roadway in extremely swelling soft rock // *SpringerPlus*. 2016. Vol. 5(1). 1310. doi: 10.1186/s40064-016-2942-6.

References

1. Litvinsky G. G. Patterns of load formation on mine working support // *Proceedings of DonSTU*, 2016, No. 3 (46), pp. 5-15 (in Russ.).
2. Petrenko Yu. A., Novikov A. O., Podkopaev S. V., Aleksandrov S. N. About the features of load formation on working support in deep mines. Physical and technical problems of mining, 2011, Issue 14, pp. 133–141 (in Russ.).
3. Li C. Rock support design based on the concept of pressure arch // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2006, Vol. 43(7), pp. 1083–1090. doi: 10.1016/j.ijrmms.2006.02.007.
4. Driban V. A., Novikov A. O. On the mechanism of mine working stability loss and methods for control of the host rock mass conditions // *Proceedings of UkrNDMI of NAS of Ukraine*, 2012, No. 11, pp. 275–292 (in Russ.).
5. Kong X., Liu Q., Pan Y., Liu J. Stress redistribution and formation of the pressure arch above underground excavation in rock mass // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2017. doi: 10.1080/19648189.2018.1541824.
6. Huang X., Zhang Z. Stress arch bunch and its formation mechanism in blocky stratified rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2012, Vol. 4, No. 1, pp. 19-27. doi: 10.3724/SP.J.1235.2012.00019.
7. Kasyan N. N., Novikov A. O., Petrenko Yu. A., Shestopalov I. N., Reznik A. V. Metal yielding support. Patent of Ukraine, No. a201102997, 2013 (in Russ.).
8. Skobenko A. V., Khozyadkina N. V., Derysh V. V. Improving frame support of coal mine longwalls (*Sovershenstvovanie ramnoy krepki protyazhennykh vyrabotok ugol'nykh shakht*). Dnepropetrovsk: NSU Publ., 2014, 96 p. (in Russ.).
9. Lisjak A., Grasselli G. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014, Vol. 6, No. 4, pp. 301–314. doi: 10.1016/j.jrmge.2013.12.007.
10. Meshchaninov S. K. Methods of modeling and control of mining working operation reliability (*Metody modelirovaniya i upravleniya nadezhnost'yu funktsionirovaniya gornyx vyrabotok*). Dnepropetrovsk: NSU Publ., 2011, 360 p. (in Russ.).
11. Alshkane Y. M., Marshall A. M., Stace L. R. Prediction of strength and deformability of an interlocked blocky rock mass using UDEC // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017, Vol. 9, No. 3, pp. 531–42. doi: 10.1016/j.jrmge.2017.01.002.
12. Bidgoli M. N., Zhao Z., Jing L. Numerical evaluation of strength and deformability of fractured rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013, Vol. 5, No. 6, pp. 419–430. doi: 10.1016/j.jrmge.2013.09.002.
13. Kazerani T. Effect of micromechanical parameters of microstructure on compressive and tensile failure process of rock // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013 Vol. 64, pp. 44–55. doi: 10.1016/j.ijrmms.2013.08.016.
14. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013, Vol. 60, pp. 345–352. doi: 10.1016/j.ijrmms.2013.01.011.
15. Wang X., Zhao Y., Lin X. Determination of mechanical parameters for jointed rock masses. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2011, Vol. 3, sup. 1, pp. 398–406. doi: 10.3724/SP.J.1235.2011.00398.
16. Makshankin D. N. Substantiation for steel section support application for mine workings. Extended abstract of Cand. Sci. Dissertation in engineering science, Kemerovo, 2012, 19 p. (in Russ.).
17. Demin V. F., Demina T. V., Aliev S. B., Razumnyak N. L. Investigation of rock pressure manifestations and nature of the interaction of various types of support with host rocks around mine workings. *Mining Information and Analytical Bulletin (Gornyy Informatsionno-Analiticheskiy Byulleten)* (scientific and technical journal), 2012, special issue No. 7, pp. 34–43 (in Russ.).

18. Zhang L. Evaluation of rock mass deformability using empirical methods // *Underground Space*. 2017, Vol. 2, No. 1, pp. 1–15. doi: 10.1016/j.undsp.2017.03.003.
19. Litvinsky G. G., Smekalin E. S. Effectiveness of frame support design // *Proceedings of DonSTU*, 2015, No. 1 (44), pp. 18-25 (in Russ.).
20. Koshelev K. V., Petrenko Yu. A., Novikov A. O. Protection and repair of mine workings (*Okhrana i remont gornykh vyrabotok*). Moscow: Nedra Publ., 1990, 218 p. (in Russ.).
21. Petrenko Yu. A. Geotechnical basis for maintaining stability of deep mine workings at various stages of their operation. Extended abstract of Doct. Sci. Dissertation in engineering science, Donetsk, 2008, 30 p. (in Russ.).
22. Bidgoli M. N., Jing L. Anisotropy of strength and deformability of fractured rocks // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2014, Vol. 6, No. 2, pp. 156–164. doi: 10.1016/j.jrmge.2014.01.009.
23. Saeidi O., Rasouli V., Vaneghi R. G., Gholami R., Torabi S. R. A modified failure criterion for transversely isotropic rocks // *Geoscience Frontiers*. 2013, Vol. 5, No. 2, pp. 215–225. doi: 10.1016/j.gsf.2013.05.005.
24. Ciz R., Siggins A. F., Gurevich B., Dvorkin J. Influence of microheterogeneity on effective stress law for elastic properties of rocks // *Geophysics*. 2008, Vol. 73 (1), pp. E7–E14. doi: 10.1190/1.2816667.
25. Li Q., Shi W., Yang R. Deformation mechanisms in a coal mine roadway in extremely swelling soft rock // *SpringerPlus*. 2016, Vol. 5(1). 1310. doi: 10.1186/s40064-016-2942-6.

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-213-219

Использование свойств дискретных пород для оптимизации процессов погашения выработанного пространства

Голик В. И.¹, Буй Хуан Нам², Масленников С. А.³, Анищенко В. И.⁴

¹Северо-Кавказский горно-металлургический институт, (СКГТУ), Владикавказ, Россия,

²Горно-Геологический Университет, Ханой, Вьетнам.

³Донской государственный технический университет (филиал), Шахты, Россия

⁴LLC "Spetsmodulproekt", Нью-Йорк, США

Аннотация: Оптимизация процессов погашения выработанного пространства осуществляется за счет использования свойств дискретных пород. Новое направление совершенствования технологий основано на феномене реализации остаточной прочности пород при заклинивании в процессе подземной разработки структурно-нарушенных скальных месторождений. Целью исследований является уменьшение затрат на погашение выработанного пространства при обеспечении безопасности работ. Цель достигается сравнением вариантов погашения в зависимости от образования свода естественного равновесия пород. Исследование базируется на основе положений строительной механики и механики сплошных сред с использованием феномена проявления остаточной прочности дискретных пород вследствие их заклинивания. Сформулирована концепция погашения выработанного пространства. Приведены сведения о геологическом строении исследуемого сложноструктурного месторождения скальных руд и роли тектонических структур в поведении рудовмещающего массива при вскрытии горными выработками. Приведены результаты исследования состояния массива с выделением характерных инженерно-геологических участков. Рассмотрены варианты поведения рудовмещающего массива в зависимости от естественного заклинивания элементарных структурных блоков пород в пределах свода. Уточнена возможность комбинирования способов погашения изольцией и закладкой твердеющими смесями. Рекомендована область применения результатов исследования при разработке месторождений твердых полезных ископаемых подземным способом. Определение границ области опасных сдвижений в толще пород на основе использования механизма заклинивания дискретных пород обеспечивает возможность отработки месторождений с большей эффективностью при обеспечении безопасности горных работ. Результаты исследования могут быть востребованы при подземной добыче твердых полезных ископаемых.

Ключевые слова: порода, прочность, погашение, выработанное пространство, заклинивание, управление, безопасность.

Для цитирования: Голик В. И., Буй Хуан Нам, Масленников С. А., Анищенко В. И. Использование свойств дискретных пород для оптимизации процессов погашения выработанного пространства. *Горные науки и технологии*. 2019;4(3):213-219. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-213-219.

Using Properties of Discrete Rocks to Optimize Backfilling

V. I. Golik¹, Xuan Nam Bui², S. A. Maslennikov³, V. I. Anischenko⁴

¹North-Caucasian Mining and Metallurgical Institute (SKGTU), Vladikavkaz, Russia, ✉

²Geology and Mining University, Hanoi, Vietnam.

³Donskoi State Technical University, Shakhty, Russia.

⁴LLC "Spetsmodulproekt", New York, USA

Abstract: Backfilling optimization is carried out through the use of discrete rock properties. A new line of the process improvement is based on the phenomenon of performance of residual rock strength when jamming in the process of underground mining of deposits within faulted rocks. The research is aimed at reducing costs of backfilling while ensuring the work safety. The goal is achieved by comparing backfilling options depending on the formation of rock natural self-supporting arch. The study is based on the provisions of structural mechanics and continuum mechanics using the phenomenon of performance of residual rock strength due to rock jamming. The backfilling concept has been formulated. Information on geological structure of the studied rocky ore deposit of complicated



tectonic structure and the roles of tectonic framework in the behavior of the ore-hosting rock mass in the course of opening by mine workings are presented. The findings of the study of the rock mass condition with determination of characteristic geotechnical domains are presented. Variants of the ore-hosting rock mass behavior are considered depending on natural jamming of elementary structural rock blocks within the arch. The possibility of combining sealing and setting-mix backfilling methods has been clarified. The area of the research findings application in mineral underground mining is recommended. The determination of dangerous displacement area boundaries in rock mass using the mechanism of discrete rock jamming allows achieving higher mining effectiveness while ensuring mining safety. The study results can be used in underground mining of minerals.

Keywords: rock, strength, backfilling, goaf, jamming, management, safety.

For citation: Golik V. I., Bui Xuan Nam, Maslennikov S. A., Anischenko V. I. Using properties of discrete rocks to optimize backfilling. *Mining Science and Technology*. 2019;4(3):213-219 (In Russ.). DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-213-219.

Введение

Погашение выработанного пространства является ответственным этапом эксплуатации месторождения, потому что последствия неправильно выбранного решения откорректировать трудно. Одним из направлений совершенствования технологии погашения является использование породных несущих конструкций с реализацией их механической прочности [1–3].

Концепция погашения выработанного пространства основана на том, что устойчивые во время отработки породы с течением времени обрушаются или до предельного свода равновесия, образованного заклинившимися структурными блоками, или до высоты, определяемой коэффициентом обрушения пород [4–8].

Целью исследования является снижение затрат на погашение за счет использования энергии заклинивания для управления массивом.

Результаты

В геологическом строении скальных месторождений участвуют породы различного возраста. Ведущая роль в структуре и рудоносности месторождения принадлежит разломам, к которым приурочена рудоносность (рис. 1).

Вблизи тектонических разломов трещиноватость увеличивается, достигая миниму-

ма в опережающих нарушениях и вблизи них (рис. 2).

Вывалы происходят чаще всего при пересечении сопряжений крутых и пологих зон, а также если один из швов тектонического нарушения является стенкой выработки.

Внутри геологического поля можно выделить инженерно-геологические участки (табл. 1).

Соотношение размеров допустимого по устойчивости пролета и пролета свода обрушения становится основным критерием безопасности и еще более значимым при использовании технологий с подработкой пород на большой площади, например с выщелачиванием металлов из рудных залежей значительной площади [9–11].

При возникновении свода естественного равновесия параметры погашаемой выработки определяются в первую очередь размерами структурного породного блока:

$$a = d_1 \left(\frac{10R_{сж}}{kH\gamma} - 1 \right),$$

где a – полупролет свода естественного равновесия, м; d_1 – горизонтальный размер элементарного блока пород, м; 10 – коэффициент перевода кг/см^2 в т/м^2 ; $R_{сж}$ – временное сопротивление пород сжатию, кг/см^2 ; k – коэффициент запаса; H – глубина расположения пяты от поверхности, м; γ – объемный вес пород, кг/м^3 .

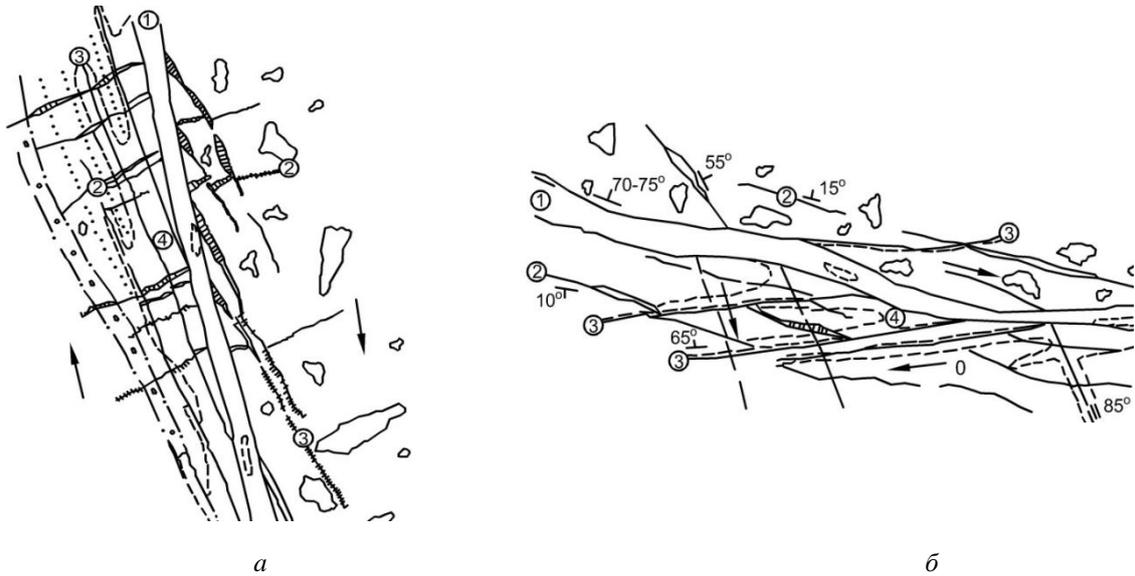


Рис. 1. План (а) и разрез (б) разлома:

1 – зона расслоения; 2 – трещины отрыва; 3 – трещины скола с глиной трения; 4 – оруденение

Fig. 1. Fault plan (a) and cross-section (b):

1 – stratification zone; 2 – ruptures; 3 – shear fractures with clay gauge; 4 – mineralization

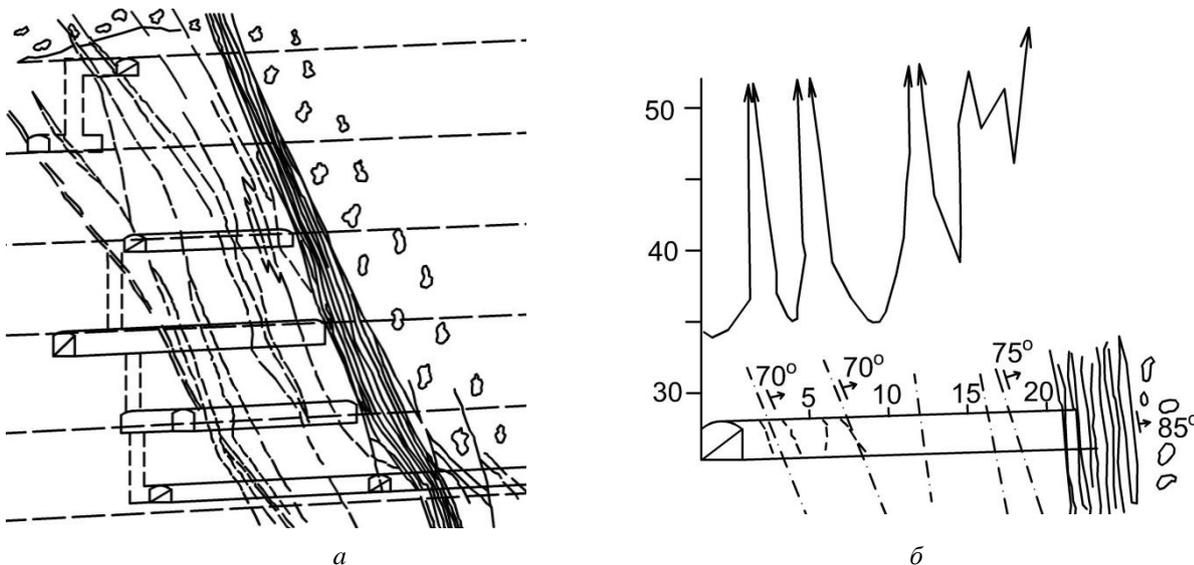


Рис. 2. Положение рудоносных структур в лежащем боку разлома (а) и характер распределения трещин в орте (б)

Fig. 2. Position of ore-bearing structures in fault footwall (a) and the nature of fracture distribution in cross drift (b)

Таблица 1

Инженерно-геологическая характеристика месторождения Ишимское
Geotechnical characteristics of Ishimskoe deposit

Характеристика участка	Объемный вес пород, т/м ³	Прочность пород, кг/см ²	Размер структурного блока, м	Коэффициент ослабления пород
Узлы сопряжений разломов с контактной зоной	2,65	639	0,4×0,4	0,37
Зоны крупных разломов и контактные зоны	2,65	587	0,8×1,6	0,43
Части тектонических блоков между разломом и контактной зоной	2,65	570	1,8×4,0	0,62

Самозаклинивание элементарных блоков пород может произойти, если пролет предельного свода B больше пролета зоны обрушения пород:

$$B \geq 2a.$$

На рис. 3 и 4 представлена зона обрушения пород для случаев, когда угол наклона очистной выработки больше угла обрушения пород:

$$\alpha \geq \frac{90^\circ + \varphi}{2};$$

$$B = \frac{2h}{\operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}} + \frac{m}{\sin \alpha},$$

где α – угол наклона выработки, град; φ – угол внутреннего трения пород, град (45–50°); h – высота выработки, м; m – ширина выработанного пространства, м; h_{oc} – высота свода заклинивания, м.

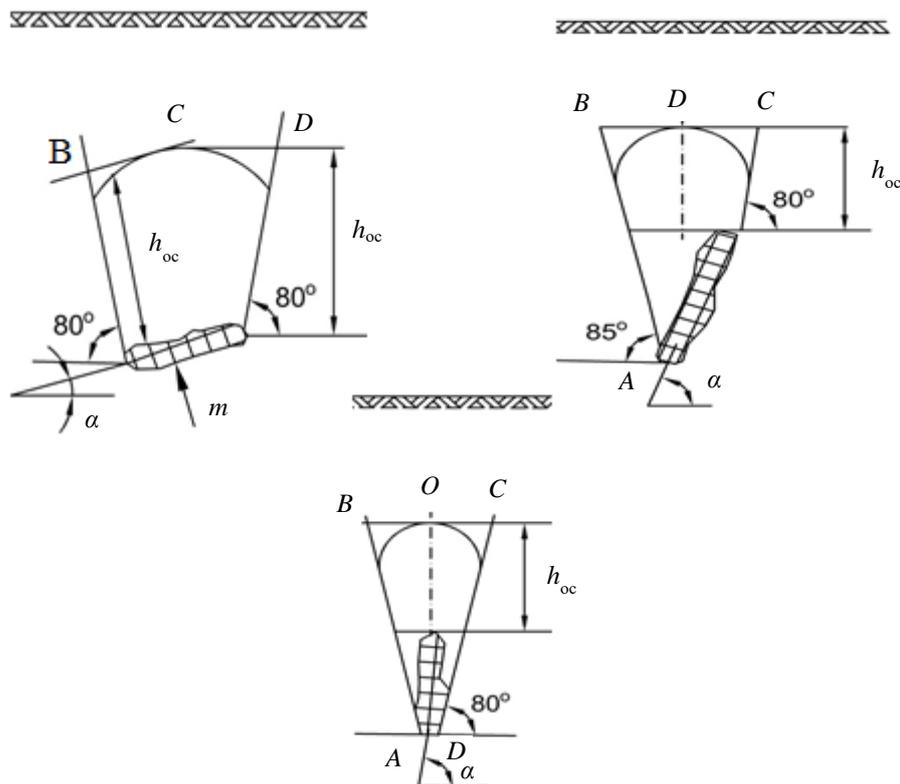


Рис. 3. Построение границ области опасных сдвижений в толще пород на разрезах вкрест простирания

Fig. 3. Construction of dangerous displacement area boundaries in rock mass on sections across the strike

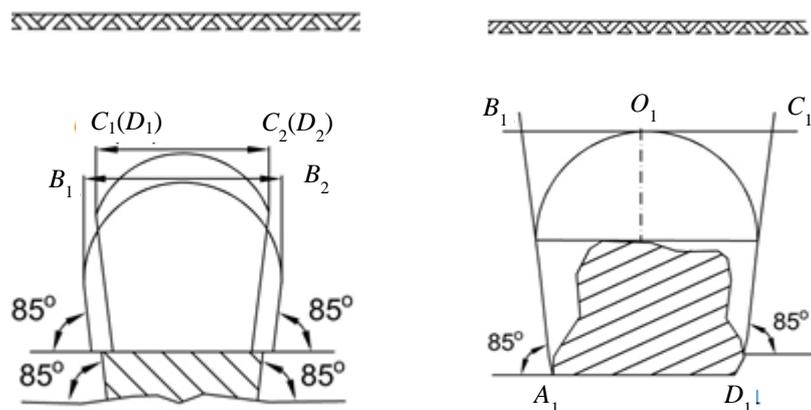


Рис. 4. Построение границ области опасных сдвижений в толще пород в вертикальной проекции

Fig. 4. Construction of dangerous displacement area boundaries in rock mass in elevation view

Высота свода самозаклинивания h_c :

– при $2a = B$:

$$h_c = \frac{a}{v},$$

где a – полупролет свода без учета коэффициента запаса k ; v – коэффициент устойчивости трещиноватых пород:

$$v = 2 \frac{d_2 R_{сж}^{11}}{d_1 R_{сж}^1},$$

где $\frac{d_2}{d_1}$ – соотношение вертикального и горизонтального размеров структурных блоков пород;

$\frac{R_{сж}^{11}}{R_{сж}^1}$ – отношение временного сопротивления горных пород сжатию R^1 в направлении распора свода и в направлении действия веса пород.

Если предельный свод пересекает весьма трещиноватые породы, показатели d_2 и $R_{сж}^{11}$ характеризуют породы разломов и зоны их влияния.

Если предельный свод пересекает весьма трещиноватые породы, показатели d_2 и $R_{сж}^{11}$ характеризуют породы разломов и зоны их влияния.

– при $2a > B$ в формулах вместо полупролета предельного свода (a) подставляется полупролет зоны обрушения пород ($0,5B$):

$$h_c = \frac{B}{2v}, \text{ и } h_c = \frac{B}{4}.$$

Условие сохранения земной поверхности для случая обрушения пород с образованием свода:

$$H^1 > h_c,$$

где H^1 – расстояние от верхней границы выработанного пространства до выветрелых пород и рыхлых отложений, м.

При несоблюдении условия выработанное пространство закладывается так, чтобы при его уменьшенной высоте обеспечивалось неравенство:

$$H^1 > h_c = \frac{B}{2v} = \frac{B}{4 \frac{d_2 R_{сж}^{11}}{d_1 R_{сж}^1}},$$

где h_c – подъем свода при частично заполненном выработанном пространстве, м.

Высота h_3 , на которую заполняется выработанное пространство:

$$\text{– при } \alpha \geq \frac{90^\circ + \varphi}{2}$$

$$h_3 > h + \left(\frac{m}{\sin \alpha} - 2H^1 \frac{d_2 R_{сж}^{11}}{d_1 R_{сж}^1} \right) \operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi}{2},$$

при отрицательном значении h_3 закладывать выработанное пространство не нужно;

$$\text{– при } \alpha < \frac{90^\circ + \varphi}{2}$$

$$h_3 > h + \left(\frac{m}{\sin \alpha} - 4H^1 \frac{d_2 R_{сж}^{11}}{d_1 R_{сж}^1} \right) \frac{\operatorname{tg} \alpha \operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}}{\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \frac{90^\circ + \varphi}{2}}.$$

Если свод естественного равновесия не возникает, высота обрушения определяется коэффициентом разрыхления пород, а зона опасного сдвижения пород – по ВНИМИ (см. рис. 3 и 4).

Если $H' < h_{oc}$, то высота массива закладки, при которой сдвижение поверхности не произойдет:

$$h_3 = \frac{khmt \operatorname{tg} \alpha - H^1 (K_p - 1)(m \operatorname{tg} \alpha + h \sin \alpha)}{kmt \operatorname{tg} \alpha - H^1 (K_p - 1) \sin \alpha},$$

где h – полная высота выработанного пространства, включая высоту массива закладки (h_3), м; m – нормальная ширина выработанного пространства, м; α – угол наклона выработанного пространства, град; K_p – коэффициент разрыхления; H^1 – глубина верхней границы выработанного пространства от выветрелых пород и отложений, м:

$$H^1 = \frac{khmt \operatorname{tg} \alpha}{(K_p - 1)(m \operatorname{tg} \alpha + h \sin \alpha)}.$$

Условие устойчивого состояния земной поверхности по ВНИМИ:

$$H^1 > H_p^1 = K_1 l_{эКВ},$$

где H_p^1 – глубина устойчивого состояния земной поверхности; K_1 – коэффициент, учитывающий прочностные свойства горных пород $l_{эКВ}$ – эквивалентный пролет:

$$l_{\text{экв}} = \frac{Ll^1}{\sqrt{(L^2 + (l^1)^2)}},$$

где L – размер выработанного пространства по простиранию, м; l^1 – размер горизонтальной поверхности выработанного пространства вкрест простирания, м.

Результаты исследования согласуются с выводами специалистов России и зарубежья [12–18]. Они могут быть востребованы при разработке месторождений скального и полускального типов при добыче твердых полезных ископаемых подземным способом.

Библиографический список

- Gattinoni P., Pizzarotti E. M., Scesi L. *Engineering Geology for Underground Works*. Springer, 2014. – 312 p.
- Dold B., Weibel L. Biogeometallurgical pre-mining characterization of ore deposits: An approach to increase sustainability in the mining process // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2013. – Vol. 20. – No. 11. P. 7777–7786.
- Goodarzi A., Oraee-Mirzamani N. Assessment of the Dynamic Loads Effect on Underground Mines Supports. 30th International Conference on Ground Control in Mining. 2011. Pp. 74–79.
- Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013. No. 60. Pp. 345–352.
- Ping Y. J., Zhong C. W., Sen Y. D., Qiang Y. J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling // *Computers and Geotechnics*. 2015. Vol. 64. P. 20–31.
- Shabanimashcool M., Li C. C. Analytical approaches for studying the stability of laminated roof strata // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015. Vol. 79. P. 99–108.
- Голик В. И., Полухин О. Н. *Природоохранные геотехнологии в горном деле*. Белгород: Изд-во БГУ, 2013.
- Дмитрак Ю. В., Голик В. И., Дзеранов Б. В. Сохранение земной поверхности от разрушения при подземной добыче руд. *Известия Тул. гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле»*. 2018. № 1. С. 12–22.
- Snelling P. E., Godin L., McKinnon S. D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada // *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*. 2013. Vol. 58. P. 166–179.
- Емельяненко Е. А. Снижение влияния горнотехнических систем на среду обитания человека при комплексном освоении медно-колчеданных месторождений комбинированной геотехнологией // *Тр. науч.-практ. конф. с международным участием «Геотехнологические методы освоения месторождений твердых полезных ископаемых»*. М.: ФГУП «ВИМС», 2016. С. 301–305.
- Каплунов Д. Р., Рыльникова М. В., Радченко Д. Н. Расширение сырьевой базы горнорудных предприятий на основе комплексного использования минеральных ресурсов месторождений // *Горный журнал*. 2013. № 12. С. 29–33.
- Kidybinski A. The role of geo-mechanical modelling in solving problems of safety and effectiveness of mining production. *Archives of Mining Sciences*. 2010. Vol. 55. No. 2. Pp. 263–278.
- Molev M. D., Stradanchenko S. G., Maslennikov S. A. Theoretical and experimental substantiation of construction regional security monitoring systems technospheric // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2015. Vol.10. No.16. Pp. 6787–6792.
- Najafi A. B., Saeedi G. R., Farsangi M. A. E. Risk analysis and prediction of out-of-seam dilution in longwall mining. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014. Vol. 70. Pp. 115–122.
- Геомеханические и аэрогазодинамические последствия подработки территорий горных отводов шахт Восточного Донбасса. Н.М. Качурин, Г.В. Стась, Т.В. Корчагина, М.В. Змеев. *Известия Тул. гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле»*. 2017. № 1. С. 170–182.

Заключение

При подземной разработке месторождений скальных руд построение границ области опасных сдвижений в толще пород на основе использования феномена заклинивания дискретных пород является важным компонентом оптимизации технологий погашения выработанного пространства, обеспечивающим возможность отработки месторождений с получением эколого-экономического эффекта при обеспечении безопасности горных работ.

16. Дмитрак Ю. В., Логачева В. М., Подколзин А. А. Геофизическое прогнозирование нарушенности и обводненности массива горных пород. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 11. С. 35–36.

17. Комащенко В. И., Васильев П. В., Масленников С. А. Технологиям подземной разработки месторождений КМА – надежную сырьевую основу // Известия Тул. гос. ун-та. Сер. «Науки о Земле». 2016. № 2. С. 101–114.

18. Семенова И. Э., Аветисян И. М., Земцовский А. В. Геомеханическое обоснование отработки запасов глубокого горизонта в сложных горно-геологических и геодинамических условиях. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. №12. С. 65–73.

References

1. Gattinoni P., Pizzarotti E. M., Scesi L. Engineering Geology for Underground Works. Springer, 2014. 312 p.
2. Dold B., Weibel L. Biogeometallurgical pre-mining characterization of ore deposits: An approach to increase sustainability in the mining process // Environmental Science and Pollution Research. – 2013. – Vol. 20. – No. 11. Pp. 7777–7786.
3. Goodarzi A., Oraee-Mirzamani N. Assessment of the Dynamic Loads Effect on Underground Mines Supports. 30th International Conference on Ground Control in Mining. 2011, pp. 74–79.
4. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and stress on the strength of a fractured rock mass. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2013, No. 60. Pp. 345–352.
5. Ping Y. J., Zhong C. W., Sen Y. D., Qiang Y. J. Numerical determination of strength and deformability of fractured rock mass by FEM modeling // Computers and Geotechnics. 2015, Vol. 64, pp. 20–31.
6. Shabanimashcool M., Li C. C. Analytical approaches for studying the stability of laminated roof strata // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2015, Vol. 79. P. 99–108.
7. Golik V.I., Polukhin O.N. Environment protecting geotechnologies in mining (*Prirodookhrannyye geotekhnologii v gornom dele*). Belgorod: Publishing house of BSU, 2013 (in Russ.).
8. Dmitrak Yu. V., Golik V. I., Dzeranov B. V. Preservation of the earth's surface from failure during underground ore mining. Proceedings of Tula State University, Series "Earth Sciences", 2018, No. 1, pp. 12–22 (in Russ.).
9. Snelling P. E., Godin L., McKinnon S. D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada // International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 2013, Vol. 58, pp. 166–179.
10. Emelianenko E.A. Reducing the impact of mining systems on the human environment during the integrated development of copper-pyrite deposits using combined geotechnology // Proceedings of scientific-practical conference with international participation "Geotechnological methods for development of mineral deposits." M.: FSUE "VIMS" Publ., 2016, pp. 301-305 (in Russ.).
11. Kaplunov D.R., Rynnikova M.V., Radchenko D.N. Expansion of resources base of mining enterprises based on multiple use of deposit mineral resources// Mining Journal (*Gornyy Zhurnal*), 2013, No. 12, pp. 29–33 (in Russ.).
12. Kidybinski A. The role of geo-mechanical modelling in solving problems of safety and effectiveness of mining production. Archives of Mining Sciences. 2010, Vol. 55, No. 2, pp. 263–278.
13. Molev M. D., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Theoretical and experimental substantiation of construction regional security monitoring systems technospheric // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol.10. No.16, pp. 6787–6792.
14. Najafi A. B., Saeedi G. R., Farsangi M. A. E. Risk analysis and prediction of out-of-seam dilution in longwall mining. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2014, Vol. 70, pp. 115–122.
15. Kachurin N. M., Stas G. V., T. V. Korchagina, Zmeev M. V. Geotechnical and gas dynamic consequences of undermining of mining lease areas for Eastern Donbass mines. Proceedings of Tula State University, Series "Earth Sciences", 2017, No. 1, pp. 170–182 (in Russ.).
16. Dmitrak Yu.V., Logacheva V.M., Podkolzin A.A. Geophysical prediction of broken condition and watering of rock mass. Mining Informational and Analytical Bulletin (magazine), 2006, no. 11, pp. 35-36 (in Russ.).
17. Komashchenko V.I., Vasiliev P.V., Maslennikov S.A. Reliable raw material base for KMA deposit underground mining// Proceedings of Tula State University, Series "Earth Sciences", 2016, No. 2, pp. 101–114 (in Russ.).
18. Semenova I.E., Avetisyan I.M., Zemtsovsky A.V. Geotechnical substantiation of extraction of deep level reserves under complicated mining, geological and geodynamic conditions. Mining Informational and Analytical Bulletin (magazine), 2018, no. 12, pp.65–73 (in Russ.).

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-220-226

Finite Element Simulation of Multiphase Flow in Oil Reservoirs – Cmsol Multiphysics as Fast Prototyping Tool in Reservoir Simulation

T. H. Nassan, M. Amro

Technische Universität Berg Akademie Freiberg, Freiberg, Germany

Abstract: Reservoir simulation is a powerful tool to mimic the formation behaviour during primary production and later on for planning enhanced oil recovery (EOR) pattern. However, all available commercial and developed scientific/academic software for this purpose is based on either finite difference method (FDM) or finite volume method (FVM). Recently finite element method started to gain more attention in the scientific and commercial practices due to its robust results and the ability to deal with complex boundaries. COMSOL Multiphysics is a finite element method (FEM)-based software, having very special features, which are different from standard reservoir engineering software packages like Eclipse or CMG, which are black box-type software. The most important feature of the COMSOL is that user can see equation and modify it – customize for specific conditions and objectives, as well as couple different physics together and apply different solvers, which are under user's disposal. In this paper, short background of FEM will be illustrated and then the mathematical models of two-phase immiscible flow of water and heavy oil will be reviewed and simulated using COMSOL Multiphysics on the famous inverted five-spot model. The comparison between the results of Cmsol Multiphysics and Eclipse shows good agreement. This study is the first step in applying Cmsol Multiphysics to reservoir simulation. Further steps will involve simulating thermal enhanced oil recovery using steam flooding technique and coupling Cmsol Multiphysics with CMG software package to enhance simulation inputs and outputs.

Keywords: oil reservoir simulation, enhanced oil recovery methods, finite element method, COMSOL Multiphysics, mathematical models of two-phase immiscible flow of water and heavy oil.

For citation: Nassan T. H., Amro M. Finite element simulation of multiphase flow in oil reservoirs – Cmsol Multiphysics as fast prototyping tool in reservoir simulation. *Mining Science and Technology*. 2019;4(3):220-226. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-220-226.

Конечно-элементное моделирование многофазного течения в нефтенасыщенных пластах-коллекторах – Cmsol Multiphysics как инструмент быстрого создания упрощенной модели при моделировании пласта

Нассан Т. Х., Амро М.

Фрайбергская горная академия, Фрайберг, Германия

Аннотация: Моделирование пласта является мощным инструментом для имитации поведения пласта при первичной добыче, а затем для планирования схем повышения нефтеотдачи пласта (EOR). Однако всё коммерческое и целевое разработанное научное программное обеспечение для этой цели основано либо на методе конечных разностей (FDM), либо на методе конечных объемов (FVM). В последнее время метод конечных элементов (FEM) стал привлекать всё большее внимание в научной и промышленной областях благодаря его надежным результатам и способности работать при сложных границах. COMSOL Multiphysics – это программное обеспечение, основанное на методе конечных элементов, и оно обладает совершенно особыми функциями, которые отличаются от стандартных пакетов программного обеспечения для проектирования разработки пластов, таких как Eclipse или CMG, в которых используется программное обеспечение, основанное на принципе «черного ящика». Самая важная особенность COMSOL заключается в том, что можно видеть уравнение и изменять его в соответствии с потребностями задачи, объединять различные физические процессы/свойства и решать задачи с помощью различных средств, которые находятся в распоряжении пользователя. В этой статье будет представлен краткий обзор FEM, а затем будут рассмотрены и построены математические модели двухфазного несмешивающегося потока вода–тяжелая нефть с использованием COMSOL Multiphysics на основе знаменитой обратной пятиточечной схемы размещения скважин.



Сравнение результатов COMSOL Multiphysics и Eclipse показывает их хорошее согласие. Это исследование является первым шагом в использовании COMSOL Multiphysics для моделирования пласта. Дальнейшие шаги будут направлены на моделирование повышения нефтеотдачи за счет тепловой энергии с использованием метода парового заводнения и совместного использования COMSOL Multiphysics с пакетом CMG для улучшения входных и выходных данных моделирования.

Ключевые слова: моделирование нефтяного пласта, методы повышения нефтеотдачи пласта, метод конечных элементов, COMSOL Multiphysics, математические модели двухфазного несмешивающегося потока вода–тяжелая нефть.

Для цитирования: Nassan Т. Н., Амро М. Конечно-элементное моделирование многофазного течения в нефтенасыщенных пластах-коллекторах – Comsol Multiphysics как инструмент быстрого создания упрощенной модели при моделировании пласта. *Горные науки и технологии*. 2019;4(3):220-226. DOI: 10.17073/2500-0632-2019-3-220-226.

1. Introduction

Reservoir simulation combines mathematics, physics, reservoir engineering, and computational science to develop a tool for predicting oil and gas reservoirs performance at different operating patterns [1]. To describe the fluid flow inside an oil or gas reservoir a set of partial differential equations (PDE's) must be solved with the use of consistent set of initial and boundary conditions. Different numerical methods are applied to solve these equations, but the most applicable methods in commercial and scientific software are finite difference method (FDM) followed by finite volume method (FVM). The application of finite element method (FEM) is still very limited in this branch of science.

In this paper, short background of FEM will be illustrated and then the mathematical models of two-phase immiscible flow of water and heavy oil will be reviewed and simulated using COMSOL Multiphysics on the famous inverted five-spot model. The comparison between the results of Comsol Multiphysics and Eclipse shows good agreement.

2. Finite element method

While FDM and FVM can be considered as easier methods in terms of programming language, FEM is a little bit difficult to program due to its speciality in equation discretization. There are different procedures to solve PDE's in FEM, but the most famous method is the Galerkin method. To solve PDE using Galerkin approach the following steps should be followed [2]:

- multiply the original equation with a test function;
- integrate the equation and apply boundary conditions to produce weak form of the original equation;
- write the finite element solution as linear sum of a set of basis function (in the Galerkin method, test functions and basis functions are identical);
- apply the finite element solution into the weak form equation;
- solve the set of algebraic equations produced at the previous step;
- perform the error analysis.

3. Computational methods

3.1. Two-phase immiscible flow model

Two-phase flow in any porous medium can be described by continuity and momentum equations for each phase [2, 4, 5].

Mass conservation (continuity equation)

Let the porous medium fills a domain $\Omega \subseteq R^3$. Conservation equation for each phase α is written as:

$$\frac{\partial(\phi S_{\alpha} \rho_{\alpha})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_{\alpha} u_{\alpha}) = q_{\alpha}. \quad (1)$$

Darcy's law (momentum equation).

It is also defined for each phase α :

$$u_{\alpha} = -\frac{k k_{\alpha}}{\mu_{\alpha}} (\nabla p_{\alpha} - \rho_{\alpha} g \nabla z); \quad \alpha = w, o, g. \quad (2)$$

Define the mobility for each phase too:

$$\lambda_{\alpha} = k_{r\alpha} / \mu_{\alpha},$$

where total mobility is $\lambda = \sum_{\alpha} \lambda_{\alpha}$.

Fractional flow for each phase $f_\alpha = \lambda_\alpha / \lambda$ and $\sum_\alpha f_\alpha = 1$.

In the case of two phase flow for oil and water, the total velocity is:

$$u = u_o + u_w.$$

To close the equations' system, two customary equations for saturation and capillary pressure are introduced as follows:

$$S_w + S_o = 1,$$

$$P_c = P_o - P_w.$$

3.2. Fractional flow formulation of immiscible two-phase model

Equation (1) can be simplified by the following assumptions [3]:

- temperature is constant in the domain;
- there are two phases: water (w) and oil (o);
- there are two components: water (w), only in the water phase, and oil (o), only in the oil phase;
- the rock (porous matrix) and the fluids are incompressible;
- the solid matrix is not poroelastic; this means that the available pore space (porosity) is constant.

Applying equation (2) into (1) results in:

$$\frac{\partial(\phi S_\alpha \rho_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho_\alpha \left(\frac{kk_\alpha}{\mu_\alpha} (\nabla p_\alpha - \rho_\alpha g \nabla z) \right) \right) = q_\alpha. \quad (3)$$

When applying the above assumptions and adding oil and water continuity equations, equation (1) can be written for the two-phase system as:

$$\nabla \cdot u = q_o - q_w. \quad (4)$$

Subtracting the continuity equation for the two phases produces:

$$\phi \frac{\partial(S_\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot u = q_\alpha. \quad (5)$$

This will lead to the total velocity and phase velocities:

$$u = -k[\lambda \nabla p - \lambda_w \nabla p_c - (\lambda_w \rho_w + \lambda_o \rho_o) g \nabla z]; \quad (6)$$

$$u_w = f_w u + k \lambda_o f_w \nabla p_c + k \lambda_o f_w [(\rho_w - \rho_o) g \nabla z]; \quad (7)$$

$$u_o = f_o u - k \lambda_w f_o \nabla p_c + k \lambda_w f_o [(\rho_o - \rho_w) g \nabla z]. \quad (8)$$

Neglecting capillary forces leads to our model that may be applied in Comsol Multiphysics:

$$u = -k[\lambda \nabla p - (\lambda_w \rho_w + \lambda_o \rho_o) g \nabla z]; \quad (9)$$

$$u_w = f_w u + k \lambda_o f_w [(\rho_w - \rho_o) g \nabla z]; \quad (10)$$

$$u_o = f_o u + k \lambda_w f_o [(\rho_o - \rho_w) g \nabla z]. \quad (11)$$

3.3. Comsol implementation of immiscible two-phase model

Simulation steps using COMSOL Multiphysics® software are different from the traditional reservoir simulation software packages owing to the speciality in discretization procedure used in FEM that is significant difference compared to FDM and FVM. In general, the simulation procedure is as follows:

- setting model environment;
- creating geometric objects;
- specifying materials properties;
- defining physics boundary conditions;
- creating the mesh;
- running simulation;
- post-processing of the results.

Mathematical module is used due to its merits in stabilizing the solution, and we use general form and coefficient form PDE to solve pressure (p) and saturation (s) equations, respectively. The numerical study is applied on the famous SPE case study quarter five-spot inverted model shown in Fig. (1) and meshed in Fig. (2).

Pressure equation

General form time dependent PDE from mathematical module in Comsol is applied to pressure equation (4) with p as an independent variable. The components of the total velocity are the components of conservative flux vector. There is no source term, equation (11).

$$e_\alpha \frac{\partial p}{\partial t} + d_\alpha \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma = f. \quad (12)$$

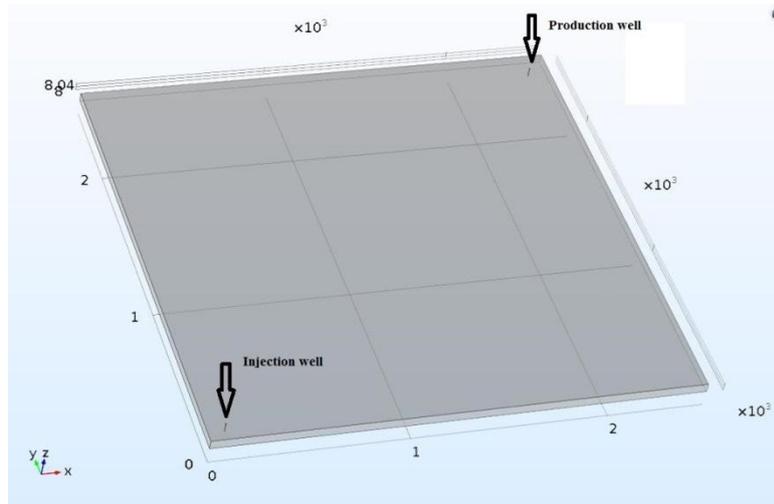


Fig. 1. Quarter five-spot inverted model

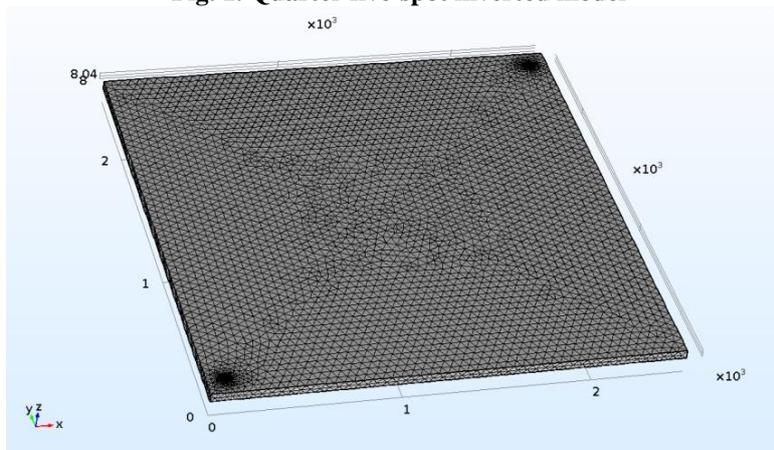


Fig. 2. Triangular mesh of the domain

Initial conditions

Initial pressure in the whole reservoir
 $P(t_o) = p_{in}$ and $\partial p / \partial t = 0$.

Boundary conditions

Injection well $-n.u = u_{in}$.

Production well $p = p_{out}$.

Saturation equation

Coefficient form time dependent PDE from mathematical module in Comsol is applied to saturation (4) with S_w as an independent variable. The components of water velocity are the components of conservative flux source. There is no source term and c used as stabilization parameter.

$$e_\alpha \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_\alpha \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + \beta \cdot \nabla u + \alpha u = f. \quad (13)$$

Initial conditions

Initial pressure in the whole reservoir
 $S_w(t_o) = S_{wc}$ and $\partial S_w / \partial t_o = 0$.

Boundary conditions

Injection well $S_w = 1$.

Production well $-n \cdot (-c \nabla S_w + u_w) = -u_w$.

Simulation findings

Selected data from [1] are chosen to be applied in this study. Figs. (3) to (6) illustrate the saturation profile in the domain at different periods through the life of the reservoir where the oil saturation decreases significantly toward the production well to reach minimum at 2350 days. Fig. 7 shows the saturations (S_o, S_w) as the function of time. Fractional flow (f_o, f_w) is shown in Fig. 8. The comparison between the daily production from Comsol and Eclipse-100 shows almost identical results for the first period before water breakthrough, Fig. 9.

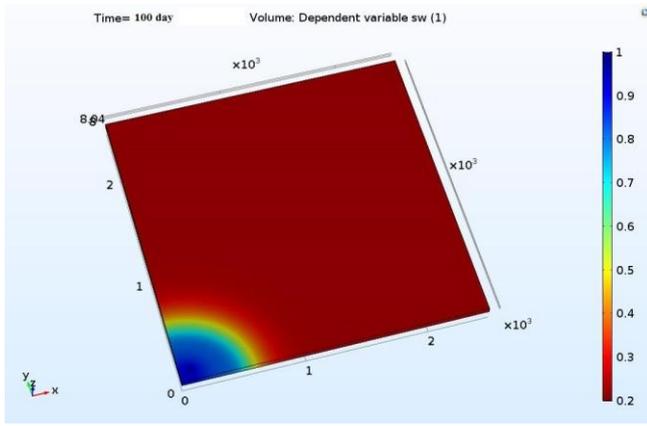


Fig. 3. Saturation profile after 100 days

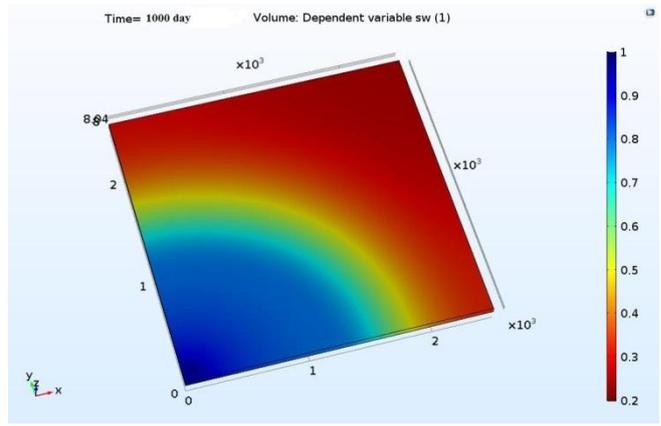


Fig. 4. Saturation profile after 1000 days

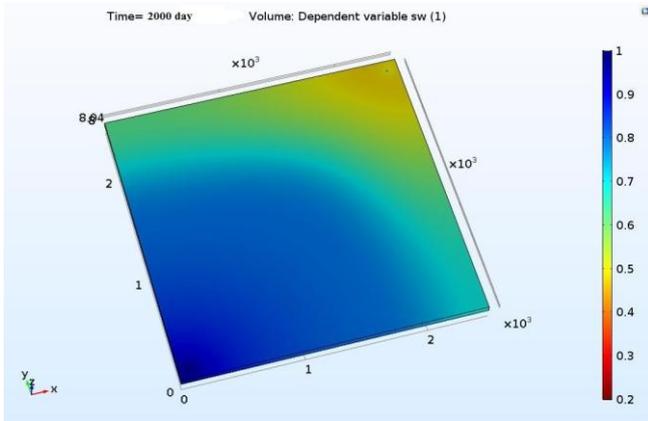


Fig. 5. Saturation profile after 2000 days

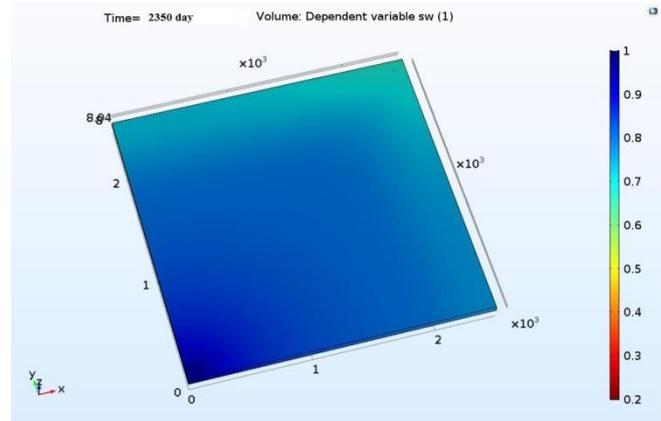


Fig. 6. Saturation profile after 2350 days

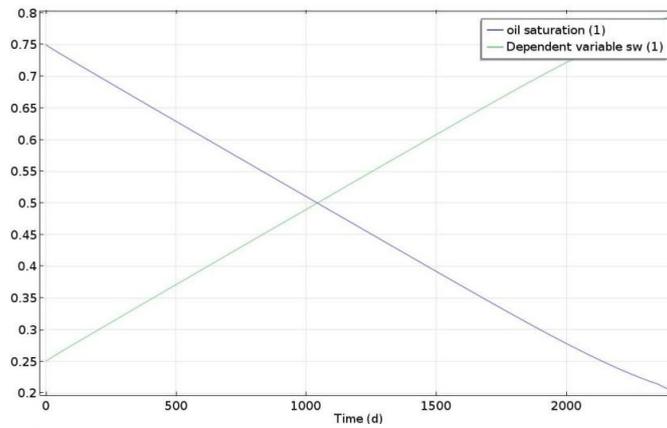


Fig. 7. Average oil and water saturation vs. time (days)

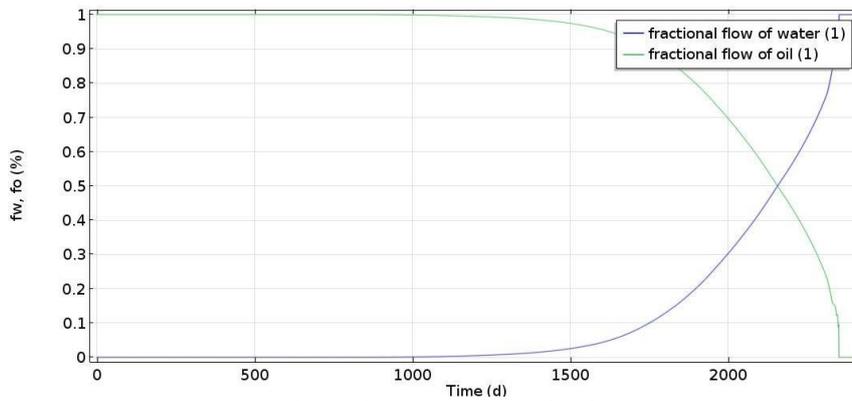


Fig. 8. Fractional flow of oil and water (f_w, f_o) vs. time (days)

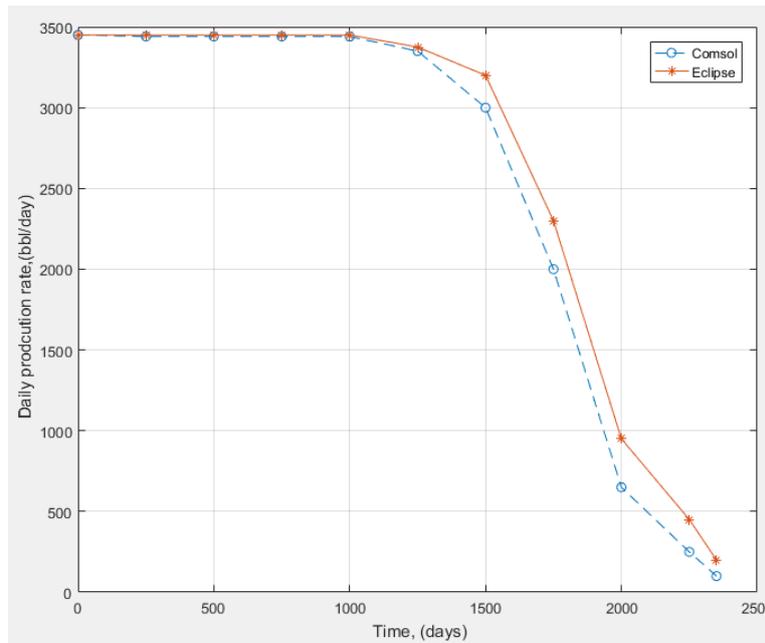


Fig. 9. Daily oil production rate (comparison of Comsol and Eclipse results)

3.5. Heavy oil model

Heavy oil model can be derived from classical continuity equation (1) and Darcy's law [4] as follows:

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_w}{B_w} \right) + \bar{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{B_w} u_w \right) = \tilde{q}_w;$$

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_o}{B_o} \right) + \bar{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{B_o} u_o \right) = \tilde{q}_o;$$

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{S_g}{B_g} + \frac{R_{so} S_o}{B_o} \right) + \bar{\nabla} \cdot \left(\frac{1}{B_g} u_g + \frac{R_{so}}{B_o} S_o \right) = \tilde{q}_g.$$

Momentum equation

$$u_\alpha = -\frac{kk_\alpha}{\mu_\alpha} (\nabla p_\alpha - \rho_\alpha g \nabla z); \quad \alpha = w, o, g,$$

where B_α is formation volume factor and R_{so} is gas solubility in oil phase.

This model must be manipulated and can be written in two-equation model for applying in Comsol environment. The new model is called phase formulation model with total velocity:

Total velocity

$$u = u_o + u_w + u_g = \sum_\beta u_\beta;$$

$$u = -k\lambda (\nabla p - g \nabla z \sum_\beta f_\beta \rho_\beta + \sum_\beta f_\beta p_{c\beta o});$$

$$p_{c oo} = 0;$$

$$u_\alpha = f_\alpha u + k f_\alpha \sum_\beta \lambda_\beta (\nabla (p_{c\beta o} - p_{c\alpha o}) - (\rho_\beta - \rho_\alpha) g \nabla z),$$

$$\alpha, \beta = o, w, g; \quad \alpha \neq \beta.$$

Pressure equation:

$$\nabla \cdot u = \sum_\beta B_\beta \left(\tilde{q}_\beta - \phi S_\beta \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{B_\beta} \right) - u_\beta \cdot \nabla \left(\frac{1}{B_\beta} \right) \right) -$$

$$- B_g \left(R_{so} \tilde{q}_o + \frac{\phi S_o}{B_o} \frac{\partial R_{so}}{\partial t} + \frac{1}{B_o} u_o \cdot \nabla R_{so} \right). \quad (14)$$

Saturation equation:

$$\phi \frac{\partial S_\alpha}{\partial t} + \nabla \cdot u_\alpha =$$

$$= B_\beta \left(q_\alpha - \phi S_\alpha \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{B_\alpha} \right) - u_\beta \cdot \nabla \left(\frac{1}{B_\alpha} \right) \right). \quad (15)$$

Customary equations:

$$S_w + S_o + S_g = 1;$$

$$p_{cgo} = p_g - p_o;$$

$$p_{cow} = p_o - p_w.$$

Equations (14) and (15) can be applied in Comsol Multiphysics in the same way as in two-phase flow model.

Conclusions and future work

Principle of FEM has been reviewed and mathematical models of two-phase immiscible flow model and heavy oil model have been formulated to be easily applied in Comsol Multiphysics to illustrate saturation profile in the reservoir. The results show good agreement with commercial software Eclipse 100.

This study is the first step in applying Comsol Multiphysics® to reservoir simulation. Further steps will involve simulating thermal enhanced oil recovery using hot water and steam flooding techniques and coupling Comsol Multiphysics with CMG software package to enhance simulation inputs and outputs.

References

1. Turgay Ertekin, Jamal Abu-Kassem, Gregory King, Basic applied reservoir simulation, SPE textbook series vol.7, Richardson, Texas, 2001.
2. Zhangxin Chen, Guanren Huan, Yuanle Ma, Computational methods in multiphase flows in porous media, SIAM-Philadelphia, 2006.
3. Jan Dirk Jansen. A Systems description of flow through porous media, Springer, 2013.
4. Zhangxin Chen, Reservoir simulation: Mathematical techniques in oil recovery, SIAM-Philadelphia, 2007.
5. Martin J. Blunt, Multiphase flow in permeable media: A pore-scale perspective, Cambridge University press, Cambridge, 2017.
6. COMSOL Multiphysics Reference Manual, Version 5.2'', COMSOL Inc., (2017)

Acknowledgments

DAAD (German Academic Exchange Service), Leadership for Syria program (LfS), and Institute of Drilling and Fluid Mining Engineering are gratefully acknowledged for sponsoring my PhD research scholarship at Freiberg University of Technology.