

ВЕСТНИК ТОМСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА

УПРАВЛЕНИЕ,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА

TOMSK STATE UNIVERSITY
JOURNAL OF CONTROL AND COMPUTER SCIENCE

Научный журнал

2022

№ 60

Зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере
массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия
(свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-29497 от 27 сентября 2007 г.)

Подписной индекс в объединённом каталоге «Пресса России» 44031

Журнал включен в «Перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»,
Высшей аттестационной комиссии

Founder – Tomsk State University

EDITORIAL BOARD

Alexander Gortsev – Editor-in-Chief, Doctor of Sc., Prof., Head of the Applied Mathematics Department Tomsk State University. Tel: +73822529599
Valery Smagin – Deputy Editor-in-Chief, Doctor of Sc., Prof. of the Applied Mathematics Department Tomsk State University. Tel: +73822529599
Lyudmila Nezhelskaya – Executive Editor, Doctor. of Sc., Prof. of the Applied Mathematics Department Tomsk State University.
E-mail: vestnik_uvti@mail.tsu.ru

Sergey Vorobeychikov – Doctor of Sc., Prof. of the System Analysis and Mathematical Modeling Department Tomsk State University
Vladimir Vishnevsky – Doctor of Sc., Prof. Head of the laboratory Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia).
Gennady Koshkin – Doctor of Sc., Prof. of the System Analysis and Mathematical Modeling Department Tomsk State University
Yury Kostyuk – Doctor of Sc., Prof. of the Theoretical Informatics Department Tomsk State University
Anjela Matrosova – Doctor of Sc., Prof. of the Department of Computer Security Tomsk State University
Anatoly Nazarov – Doctor of Sc., Prof. of the Probability Theory and Mathematical Statistics Department Tomsk State University
Konstantin Samouylov – Doctor of Sc., Prof., Head of the Applied Probability and Informatics Department RUDN University (Moscow, Russia)
Eugene Semenkina – Doctor of Sc., Prof. System Analysis and Operations Research Department Reshetnev Siberian State University of Science and Technology (Krasnoyarsk, Russia)
Sergey Sushchenko – Doctor of Sc., Prof., Head of the Applied of Information Department Tomsk State University
Mais Farkhadov – Doctor of Sc., Head of the laboratory Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia).
Gurami Tsitsishvili – Doctor of Sc., Prof., Chief researcher Institute for Applied Mathematics Far Eastern Branch of RAS, Prof. Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russia)
Editorial address:
Institute of Applied Mathematics and Computer Science,
unit of Applied Mathematics
National Research Tomsk State University
36 Lenina Avenue, Tomsk, 634050
Telephone / fax: +73822529599
E-mail: vestnik_uvti@mail.tsu.ru

EDITORIAL COUNCIL

Ana Rosa Cavalli
PhD, Prof.
University VII Paris, France
Alexander Dudin
Doctor of Sc., Prof.
Belarusian State University
Minsk, Republic Belorussia
Reindert Nobel
Doctor of Sc., Associate Prof.
Vrije University, Amsterdam,
Netherlands
Enco Orzinger
PhD, Prof.
University of Rome, Italy
Paolo Prinetto
Prof. Politechnic Institute,
Torino, Italy

Gilbert Saporta
PhD, Prof.
Pierre and Marie Curie
University, Paris, France
Raimund Ubar
Doctor of Sc., Prof.
University of Technology
Tallinn, Estonia
Nina Yevtushenko
Doctor of Sc., Prof.
Ivannikov V.P. ISP RAS
Moscow, Russia
Yervant Zorian
PhD, Fellow & Chief Architect,
Synopsys, Mountain View,
CA, USA

JOURNAL INFO

Tomsk State University Journal of Control and Computer Science is an independent peer-reviewed research journal that welcomes submissions from across the world.
Tomsk State University Journal of Control and Computer Science is issued four times per year, and can be subscribed to in the Russian Press Joint Catalogue (Subscription Index 44031)
The publication in the journal is free of charge and may be in Russian or in English.
The topics of the journal are the following:
• *control of dynamical systems,*
• *mathematical modeling,*
• *data processing,*
• *informatics and programming,*
• *discrete function and automation,*
• *designing and diagnostics of computer systems.*
Rules of registration articles are given in a site:
<http://journals.tsu.ru/informatics/>
ISSN 2311-2085 (Online), ISSN 1998-8605 (Print).

Учредитель – Томский государственный университет

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Горцев Александр Михайлович – гл. редактор, проф., д-р техн. наук, зав. кафедрой прикладной математики ТГУ. Тел. +73822529599
Смагин Валерий Иванович – зам. гл. редактора, проф., д-р техн. наук, проф. кафедры прикладной математики ТГУ. Тел. +73822529599
Нежельская Людмила Алексеевна – ответственный секретарь, доц., д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры прикладной математики ТГУ
E-mail: vestnik_uvti@mail.tsu.ru

Воробейчиков Сергей Эрикович – д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры системного анализа и математического моделирования ТГУ
Вишневецкий Владимир Миронович – проф., д-р техн. наук, зав. лабораторией Института проблем управления РАН (г. Москва)
Кошкин Геннадий Михайлович – проф., д-р физ.-мат. наук, проф. кафедры системного анализа и математического моделирования ТГУ
Костюк Юрий Леонидович – проф., д-р техн. наук, проф. кафедры теоретической информатики ТГУ
Матросова Анжела Юрьевна – проф., д-р техн. наук, проф. кафедры компьютерной безопасности ТГУ
Назаров Анатолий Андреевич – проф., д-р техн. наук, проф. кафедры теории вероятностей и математической статистики ТГУ
Самуйлов Константин Евгеньевич – проф., д-р техн. наук, зав. кафедрой прикладной информатики и теории вероятностей РУДН (г. Москва)
Семенкин Евгений Станиславович – проф., д-р техн. наук, проф. каф. системного анализа и исследования операций, СибГУ им. акад. М.Ф. Решетнева (г. Красноярск)
Сушенко Сергей Петрович – проф., д-р техн. наук, зав. кафедрой прикладной информатики ТГУ
Фархадов Маис Паша Оглы – д-р техн. наук, зав. лабораторией Института проблем управления РАН (г. Москва)
Цицашвили Гурами Шалвович – проф., д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр. Института прикладной математики ДВО РАН, проф. ДВФУ (г. Владивосток)

Адрес редакции и издателя: 634050, Томск, пр. Ленина, 36
Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Институт прикладной математики и компьютерных наук,
отделение прикладной математики
Телефон / факс: +73822529599
E-mail: vestnik_uvti@mail.tsu.ru

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Ана Роза Ковали
д-р. философии, проф.
Университет VII Париж, Франция
Александр Дудин
д.ф.-м.н., проф.
БГУ, Минск,
Республика Беларусь
Рейндерт Нобель
д-р., доцент
Свободный университет, Амстердам,
Нидерланды
Енцо Орзингер
д-р. философии, проф.
Римский университет, Италия
Паоло Принетто
проф. Политехнический институт
Турин, Италия

Жильберт Сапорта
д-р. философии, проф.
Университет им. Пьера и Марии
Кюри, Париж, Франция
Раймонд Убар
д-р. проф.
Технологический университет,
Таллинн, Эстония
Нина Евтушенко
д-р. техн. наук, проф.
ИСП РАН им. Иваницова В.П.,
Москва, Россия
Ервант Зориан
д-р. философии,
гл. научный сотр.
Фирмы «Синописис»,
США

О ЖУРНАЛЕ

Журнал «Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика» выходит ежеквартально и распространяется по подписке
Статьи публикуются на русском и английском языках.
Тематика публикаций журнала:
• *управление динамическими системами,*
• *математическое моделирование,*
• *обработка информации,*
• *информатика и программирование,*
• *дискретные функции и автоматы,*
• *проектирование и диагностика вычислительных систем.*
Журнал входит в систему Российского Индекса Научного Цитирования (РИНЦ).
Правила оформления статей приведены на сайте:
<http://journals.tsu.ru/informatics/>
ISSN 2311-2085 (Online), ISSN 1998-8605 (Print).

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

- Паршуков А.Н.**
Метод синтеза модального регулятора для линейного дискретного объекта управления с интервальной неопределенностью коэффициентов 4
- Шашихин В.Н.**
Управление ляпуновским спектром дискретных систем с хаотической динамикой 13

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- Дудин А.Н., Дудин С.А., Дудина О.С.**
Анализ системы обслуживания с коррелированными входными потоками и изменяемыми приоритетами 21
- Перова Ю.П., Лесько С.А., Жуков Д.О., Чечурин А.В.**
Анализ и моделирование процессов в сложных социальных сетевых структурах на основе уравнения Фоккера–Планка 32
- Рудько И.М.**
Исследование влияния параметров фильтра на основе усеченных порядковых статистик (УПС-фильтра) на его выходные характеристики 42
- Цветков А.Б.**
Математическое и программное обеспечение для численного моделирования геомеханического состояния углепородного массива 52

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

- Доронина Ю.В., Скатков А.В.**
Многокритериальный анализ статистической устойчивости системных характеристик информационно-телекоммуникационных каналов 59
- Евсюткин И.В., Марков Н.Г.**
Бинарная классификация скважин нефтегазовых промыслов с использованием глубоких нейронных сетей 73
- Подкур П.Н., Смоленцев Н.К.**
Вейвлеты Мейера с кратными коэффициентами масштабирования $N > 2$ 84

ИНФОРМАТИКА И ПРОГРАММИРОВАНИЕ

- Бабанов А.М.**
Методика структуризации данных в семантических моделях типа «Сущность–Связь» 93

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ДИАГНОСТИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

- Золоторевич Л.А., Ильинков В.А.**
Определение ключа аппаратной защиты цифровых устройств 102

ДИСКРЕТНЫЕ ФУНКЦИИ И АВТОМАТЫ

- Сперанский Д.В.**
Об одном подходе к приближенному синтезу дискретных устройств с памятью 111

CONTENTS

CONTROL OF DYNAMICAL SYSTEMS

- Parshukov A.N.**
Method of synthesis of a modal regulator for a linear discrete-time system with interval uncertainty of coefficients 4
- Shashikhin V.N.**
Control of the Lyapunov spectrum of discrete systems with chaotic dynamics 13

MATHEMATICAL MODELING

- Dudin A.N., Dudin S.A., Dudina O.S.**
Analysis of a queuing system with correlated arrival flows and variable priorities 21
- Perova J.P., Lesko S.A., Zhukov D.O., Chechurin A.V.**
Analysis and modeling of processes in complex social network structures based on the Fokker-Planck equation 32
- Rudko I.M.**
Investigating the effect of filter parameters based on truncated order statistics (TOS-filter) on its output characteristics 42
- Tsvetkov A.B.**
Mathematical and software for numerical modeling of the geomechanical state of the carbon mass 52

DATA PROCESSING

- Dronina Yu.V., Skatkov A.V.**
Multicriteria analysis of statistical stability of system characteristics of information and telecommunication channels 59
- Evsyutkin I.V., Markov N.G.**
Binary classification for wells of oil and gas field with the use of deep neural networks 73
- Podkur P.N., Smolentsev N.R.**
Meyer wavelets with multiple scale factors $N > 2$ 84

INFORMATICS AND PROGRAMMING

- Babanov A.M.**
Technique of data structuring in semantic models of the “Entity-Relationship” type 93

DESIGNING AND DIAGNOSTICS OF COMPUTER SYSTEMS

- Zolotorevich L.A., Ilyinkov V.A.**
Determining security key the hardware for digital devices 102

DISCRETE FUNCTION AND AUTOMATONS

- Speranskiy D.V.**
On one approach to approximate synthesis of discrete devices with memory 111

Научная статья

УДК 004.942

doi: 10.17223/19988605/60/6

Математическое и программное обеспечение для численного моделирования геомеханического состояния угленородного массива

Андрей Борисович Цветков

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия, atsvet@mail.ru

Аннотация. Предлагается подход для построения нелинейной математической модели напряженно-деформированного состояния угленородного массива, в которой учитывается интегральное воздействие на горные породы природных и техногенных сил. Для исследования предложенной нелинейной модели разработан комплекс проблемно-ориентированных программ и приведены результаты вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: нелинейная математическая модель; напряженно-деформированное состояние; массив горных пород

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Кемеровской области в рамках научного проекта № 20-41-420004.

Для цитирования: Цветков А.Б. Математическое и программное обеспечение для численного моделирования геомеханического состояния угленородного массива // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2022. № 60. С. 52–58. doi: 10.17223/19988605/60/6

Original article

doi: 10.17223/19988605/60/6

Mathematical and software for numerical modeling of geomechanical state of carbon mass

Andrey B. Tsvetkov

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation, atsvet@mail.ru

Abstract. Underground mining is associated with mine workings and subsequent arrangement of free space in accordance with the purpose of the designed object. Man-made impact on the massif leads to violation of the natural field of stresses and formation in the field of mining of zones of high mountain pressure and rock unloading, which can lead to mountain impacts, sudden emissions of coal, rock and gas, collapses.

Analysis of results of mathematical simulation of stress-strain state of the developed section of the massif is necessary for detection and prevention of pre-accident situations. The results of experiments confirm that the stress field of undisturbed rocks, formed under the influence of natural forces, is determined by the relations of the theory of elasticity. Based on studies, it was found that under the influence of anthropogenic forces, a zone is formed around the developed space, in which the connection between stresses and deformations is non-linear. Therefore, taking into account the properties of rocks in the mathematical model, the deformation conditions of which are determined by nonlinear equations, will allow to obtain qualitatively new information on the stressed-deformed state of rocks in the field of influence of mine workings.

The article proposes an approach for constructing a nonlinear mathematical model of the stress-strain state of the carbon mass, which takes into account the integral effect on rocks of natural and man-made forces. To study the proposed nonlinear model, the author developed a set of problem-oriented programs and presented the results of computational experiments.

Keywords: nonlinear mathematical model; stress-strain state; rock mass

Acknowledgments: The study was carried out with the financial support of the Russian Federation and the Kemerovo region as part of the scientific project No. 20-41-420004.

For citation: Tsvetkov, A.B. (2022) Mathematical and software for numerical modeling of the geomechanical state of the carbon mass. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika – Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 60. pp. 52–58. doi: 10.17223/19988605/60/6

Геологическая среда – сложный природный объект. Методология описания сложных систем рассмотрена Г. Хакеном, философия которого предусматривает три уровня описания: микро-, мезо- и макроскопический [1]. Поэтому автором предлагается рассматривать геосреду как иерархическую нелинейную систему, декомпозицию которой, в зависимости от задач исследования, необходимо проводить согласно данным трем уровням.

Из геосреды на макроуровне выделяется исследуемый участок геомассива. На микроуровне возникает необходимость введения параметров, которые позволили бы описывать наиболее значимые особенности поведения на мезоуровне – это свойства горных пород и действующие на них силы. На мезо- и макроуровне связь между параметрами обеспечивается посредством уравнений, в которых учитываются не сами процессы на микроуровне, а их проявление и влияние на геосреду при воздействии природных и техногенных сил. Такой подход позволяет рассматривать общие сценарии поведения геомассива, включающего систему горных выработок, а также является основой для исследования посредством математического моделирования его геомеханического состояния [1, 2].

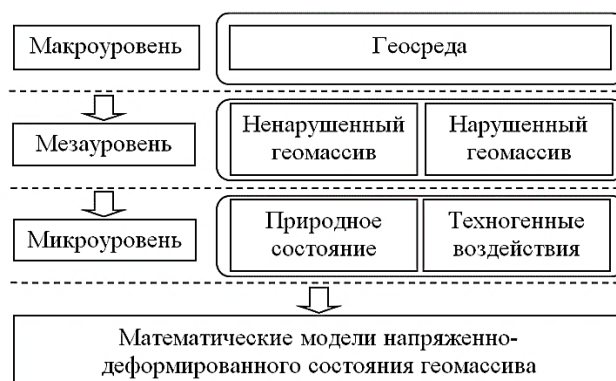


Рис. 1. Схема построения математических моделей напряженно-деформированного состояния

Fig. 1. Scheme for constructing mathematical models of the stress-strain state

Если ставится задача исследования напряженно-деформированного состояния геомассива при воздействии природных и техногенных сил, то можно ограничиться мезоуровнем, считая его представительным. Геомассив по отношению к техногенным воздействиям находится в двух состояниях – природном и нарушенном. В результате горных работ происходит существенное изменение природного состояния горного массива: локализация деформаций и формирование в области нарушения целостности горных пород разгруженных зон и концентраторов напряжений [3]. При таких условиях наблюдаются необратимые деформации, и математическая модель напряженно-деформированного состояния геомассива на мезоуровне должна строиться на основе законов, соответствующих нелинейному характеру деформирования горных пород [4, 5] (рис. 1).

1. Определяющие соотношения математической модели

Установлено, что выемка угольного пласта приводит к смещениям части углепородной толщи. На рис. 2 приведены зоны деформирования пород, которые характерны для геомассива, включающего очистные выработки [6]. По результатам натурных исследований выявлено, что в природном состоянии, формирующемся в геологическом масштабе времени, горные породы сохраняют сплошность, и для определения напряженно-деформированного состояния ненарушенной части геомассива D_1 можно применять соотношения теории упругости [3, 7].

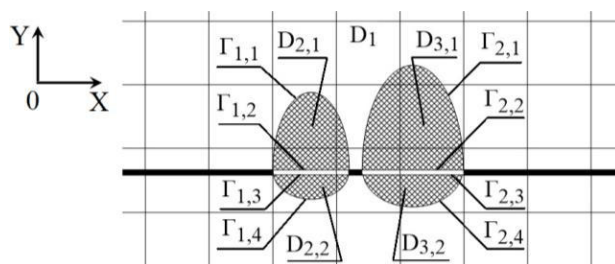


Рис. 2. Зоны деформирования

Fig. 2. Deformation zones

Исследователями отмечено, что при техногенных воздействиях породы частично ослаблены трещинами и обладают пластическими свойствами [8]. Следовательно, для зон влияния горных выработок $D_{2,1}$, $D_{2,2}$, $D_{3,1}$ и $D_{3,2}$, выделенных на рис. 2 штриховкой, характерна нелинейная зависимость деформаций от напряжений.

В соответствии с теорией сдвижения горных пород зоны деформирования $D_{2,1}$, $D_{2,2}$, $D_{3,1}$, $D_{3,2}$ определяются контурами $\Gamma_{1,1}$, $\Gamma_{1,4}$, $\Gamma_{2,1}$, $\Gamma_{2,4}$. Контурами $\Gamma_{1,2}$, $\Gamma_{1,3}$, $\Gamma_{2,2}$, $\Gamma_{2,3}$ задана область очистного выработанного пространства. Расчетная область D представлена в виде объединения областей D_1 , $D_{2,1}$, $D_{2,2}$, $D_{3,1}$, $D_{3,2}$: $D = D_1 \cup D_{1,1} \cup D_{1,2} \cup D_{2,1} \cup D_{2,2}$.

Для определения напряженно-деформированного состояния геомассива решена следующая краевая задача: в области D найти горизонтальные $u = u(x, y)$ и вертикальные перемещения $v = v(x, y)$, удовлетворяющие системе дифференциальных уравнений

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

и граничным условиям: $u(0, y) = 0$, $u(h_x, y) = 0$, $u(x, 0) = 0$, $u(x, h_y) = 0$, $v'_x(0, y) = 0$, $v'_x(h_x, y) = 0$, $\sigma_y(x, 0) = 0$, $v(x, h_y) = 0$; где h_x , h_y – размер расчетной области массива по оси абсцисс и ординат; ρ – плотность пород; g – ускорение свободного падения; $\lambda^* = E^* v^* / ((1 + v^*)(1 - 2v^*))$, $\mu^* = E^* / (2(1 + v^*))$, $E^* = 3E_1 / (2E_1 \Psi + 1 - 2v)$, $v^* = (1/2 - (1 - 2v) / (2E_1 \Psi)) / (1 + (1 - 2v) / (2E_1 \Psi))$ – переменные параметры; E_1 – начальное значение переменного параметра; v – коэффициент Пуассона; Ψ – функция, описывающая условия деформирования пород, которая равна $1/(2\mu)$ в зоне упругого деформирования, $3\varepsilon/(2\sigma(\varepsilon))$ – в остальных зонах; $\sigma(\varepsilon)$ – функция, аппроксимирующая экспериментальные диаграммы деформирования, полученные по результатам испытаний различных видов угля и пород.

Начальное значение переменного параметра E_1 предлагается определять согласно зависимости

$$E_1 = k \cdot E, \quad (2)$$

где E – модуль упругости; k – безразмерный эмпирический коэффициент, $(0 < k \leq 1)$. Для вычисления эмпирического коэффициента k разработана формула вида:

$$k = \begin{cases} \frac{y - y_{\Gamma_{1,2}}}{y_{\Gamma_{1,1}} - y_{\Gamma_{1,2}}}, & \text{если } (x, y) \in D_{2,1}; \\ \frac{y - y_{\Gamma_{1,3}}}{y_{\Gamma_{1,4}} - y_{\Gamma_{1,3}}}, & \text{если } (x, y) \in D_{2,2}; \\ \frac{y - y_{\Gamma_{2,2}}}{y_{\Gamma_{2,1}} - y_{\Gamma_{2,2}}}, & \text{если } (x, y) \in D_{3,1}; \\ \frac{y - y_{\Gamma_{2,3}}}{y_{\Gamma_{2,4}} - y_{\Gamma_{2,3}}}, & \text{если } (x, y) \in D_{3,2}; \\ 1, & \text{если } (x, y) \in D_1, \end{cases} \quad (3)$$

где y – вертикальные координаты точек, принадлежащих зонам $D_{2,1}$, $D_{2,2}$, $D_{3,1}$ и $D_{3,2}$ (см. рис. 2); $y_{Г1,1}$, $y_{Г1,2}$, $y_{Г1,3}$, $y_{Г1,4}$, $y_{Г2,1}$, $y_{Г2,2}$, $y_{Г2,3}$, $y_{Г2,4}$ – вертикальные координаты точек, принадлежащих контурам $Г_{1,1}$, $Г_{1,2}$, $Г_{1,3}$, $Г_{1,4}$, $Г_{2,1}$, $Г_{2,2}$, $Г_{2,3}$ и $Г_{2,4}$. Предложенная математическая модель исследуется методом конечных элементов.

При определении напряжений, деформаций и перемещений применяется модифицированный алгоритм метода конечных элементов, адаптированный к системам компьютерной алгебры. В разработанном алгоритме предусмотрены аналитические операции преобразования функциональных зависимостей, что обеспечивает определение коэффициентов разрешающей системы уравнений в вычислительной среде с учетом реальных условий деформирования пород в зонах влияния горной выработки [9]. Для проведения вычислительных экспериментов разработан комплекс проблемно-ориентированных программ в системе Mathematica на языке Wolfram Language [10, 11].

2. Вычислительный эксперимент

Пример исследования геомеханического состояния участка геомассива в зоне влияния системы очистных выработок приведен на рис. 3, 4.

Расчетная область исследуемого участка геомассива представлена: алевролитом крупнозернистым Ω_1 , Ω_9 , Ω_{15} ; алевролитом мелкозернистым Ω_2 , Ω_{10} , Ω_{20} ; песчаником Ω_3 , Ω_5 , Ω_8 , Ω_{11} , Ω_{13} , Ω_{18} , Ω_{21} , Ω_{23} , Ω_{26} ; переслаиванием алевролитов разной зернистости Ω_4 , Ω_{12} , Ω_{17} ; алевролитом среднезернистым Ω_6 , Ω_{14} , Ω_{24} ; аргиллитом Ω_7 , Ω_{25} ; пластом угля Ω_{16} , Ω_{19} , Ω_{22} [12]. Границы очистных выработок в угольном пласте Ω_{19} обозначены точками А, В, С, D (см. рис. 3). Краевая задача (1) решалась при условии, что массовые силы направлены вдоль вертикальной оси и создавались собственным весом пород.

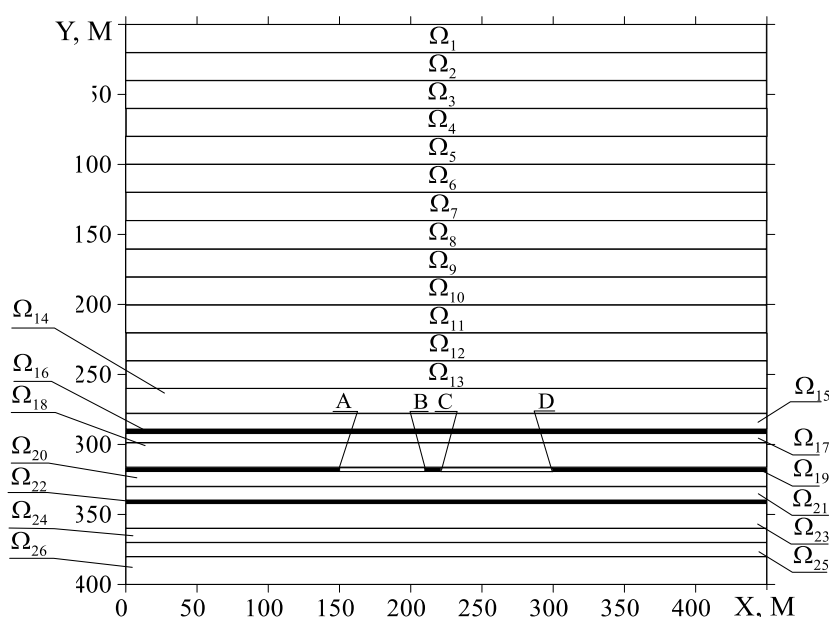


Рис. 3. Схема исследуемого участка
Fig. 3. Scheme of the study area

Результаты численного моделирования распределения вертикальных напряжений приведены на рис. 4, а, б (на рисунках знак «минус» соответствует сжимающим напряжениям).

Распределения сжимающих вертикальных напряжений характеризуются максимумами в краевых участках горных выработок обрабатываемого угольного пласта Ω_{19} и постепенным затуханием дополнительных вертикальных напряжений, вызванных техногенным воздействием, при удалении от него в направлении вмещающей толщи. На вертикальных границах расчетной области величины сжимающих вертикальных напряжений соответствуют природному полю напряжений нетронутого массива (см. рис. 4, а).

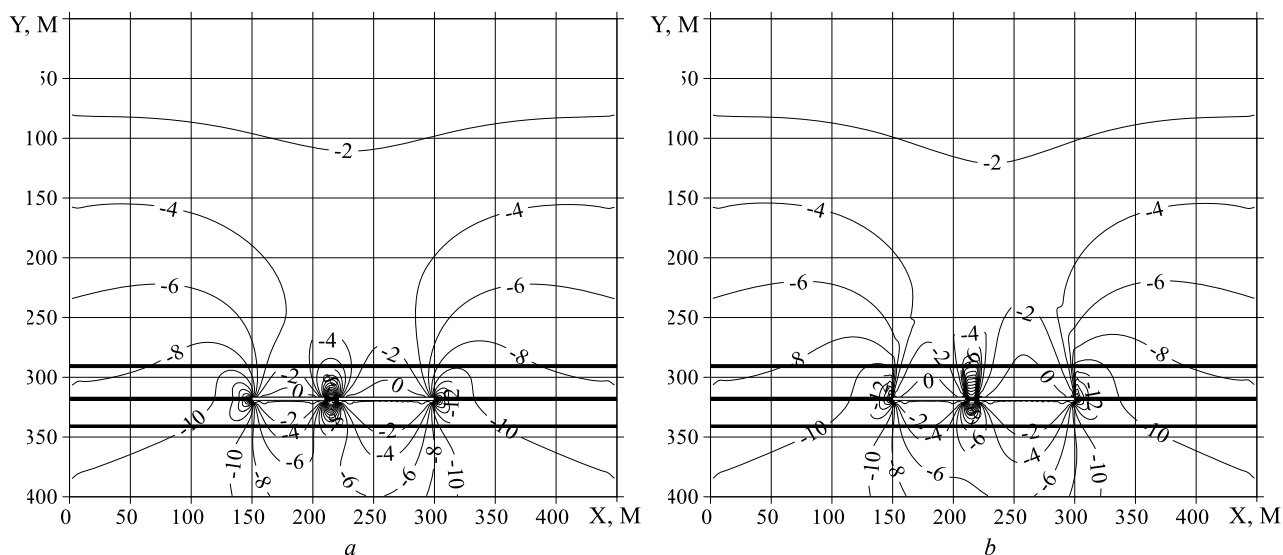


Рис. 4. Изолинии распределения вертикальных напряжений:
 а – решение краевой задачи теории упругости; б – нелинейное решение
 Fig. 4. Vertical stress distribution isolines:
 а – solution of the boundary value problem of elasticity theory; б – non-linear solution

Из анализа полученных результатов следует, что в области техногенных воздействий формируются зоны разгрузки, в которых сжимающие вертикальные напряжения меньше соответствующих напряжений в нетронutom массиве. Непосредственно в подработанных породах кровли выработанного пространства наблюдаются зоны растягивающих вертикальных напряжений.

По результатам вычислительного эксперимента выявлено, что зоны растягивающих вертикальных напряжений, сформировавшиеся над кровлей очистных выработок, для нелинейного решения в несколько раз больше, чем при условии линейной зависимости между напряжениями и деформациями (см. рис. 4, а, б).

При решении краевой задачи теории упругости подрабатываемые участки угольного пласта Ω_{16} , расположенные в зонах техногенных воздействий от пласта Ω_{19} , не попали в зоны растягивающих напряжений (рис. 4, а). При нелинейном решении подработанный пласт Ω_{16} в окрестности $x = 270$ м располагается в зоне растягивающих вертикальных напряжений (см. рис. 4, б).

Многочисленными исследованиями установлено, что прочность горных пород при растяжении на порядок меньше, чем при сжатии [5]. Поэтому в зонах растяжения наблюдаются дезинтеграция и повышенное образование пор и трещин, что приводит к способности пород вмещать больший объем газа по сравнению с их природным состоянием. В участках геомассива с повышенным по сравнению с природным удельным содержанием газа формируется газовый коллектор. Увеличение количества метана в порах газового коллектора способно приводить к выдавливанию метановоздушной смеси в направлении горных выработок, что может создавать опасные ситуации при проведении очистных работ.

Заключение

Таким образом, учет в математической модели условий деформирования горных пород, определяемых нелинейными уравнениями, позволил получить качественно новую информацию о геомеханическом состоянии в области влияния горных выработок. Техногенные воздействия на геомассив приводят к нарушению природного поля напряжений и формированию в области ведения горных работ зон повышенного горного давления и разгрузки, что может спровоцировать предаварийные ситуации. Предложенная нелинейная математическая модель позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние геомассива и выявлять при проведении горных работ опасные участки, которые необходимо учитывать при создании проектной документации.

Список источников

1. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М. : Мир, 1991. 240 с.
2. Ершов Л.В., Максимов В.А. Математические основы физики горных пород. М. : МГИ, 1968. 293 с.
3. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. М. : Недра, 1980. 360 с.
4. Цветков А.Б., Павлова Л.Д., Фрянов В.Н. Сравнительная оценка математических моделей геомеханического состояния массива горных пород // Краевые задачи и математическое моделирование : темат. сб. науч. ст. Новокузнецк, 2014. С. 314–317.
5. Карташов Ю.М., Матвеев Б.В., Михеев Г.В. Прочность и деформируемость горных пород. М. : Недра, 1979. 269 с.
6. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. Л. : Недра, 1989. 488 с.
7. Грицко Г.И., Власенко Б.В., Посохов Г.Е. Прогнозирование и расчет проявлений горного давления. Новосибирск : Наука, 1980. 159 с.
8. Ставрогин А.Н., Протосеня А.Г. Пластичность горных пород. М. : Недра, 1979. 301 с.
9. Цветков А.Б., Павлова Л.Д. Адаптация алгоритма метода конечных элементов к системе символьной математики // Научно-технологические разработки и использования минеральных ресурсов : Междунар. науч.-практ. конф. : сб. науч. ст. Новокузнецк, 2015. С. 121–125.
10. Tsvetkov A.B., Pavlova L.D., Fryanov V.N. Numerical simulation of geomechanical state of coal massif in the vicinity of underground workings in the superimposed seams // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. V. 84. Art. 012005. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/84/1/012005/pdf> (дата обращения: 22.03.2022).
11. Цветков А.Б., Павлова Л.Д., Фрянов В.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020618419. Программа численного исследования математической модели деформирования геомассива с учетом разномодульности горных пород // Реестр программ для ЭВМ. Дата регистрации 27.07.2020.
12. Штумпф Г.Г. Физико-технические свойства горных пород и углей Кузнецкого бассейна. М. : Недра, 1994. 447 с.

References

1. Hacken, G. (1991) *Informatsiya i samoorganizatsiya. Makroskopicheskiy podkhod k slozhnym sistemam* [Information and self-organization. Macroscopic approach to complex systems]. Translated from English. Moscow: Mir.
2. Ershov, L.V. & Maksimov, V.A. (1968) *Matematicheskie osnovy fiziki gornykh porod* [Mathematical Foundations of Rock Physics]. Translated from English. Moscow: MGI.
3. Borisov, A.A. (1980) *Mekhanika gornykh porod i massivov* [Mechanics of Rocks and Massifs]. Moscow: Nedra.
4. Tsvetkov, A.B., Pavlova, L.D. & Fryanov, V.N. (2014) *Sravnitel'naya otsenka matematicheskikh modeley geomekhanicheskogo sostoyaniya massiva gornykh porod* [Comparative assessment of mathematical models of the geomechanical state of the rock mass]. In: *Kraevye zadachi i matematicheskoe modelirovanie* [Boundary problems and mathematical modeling]. Novokuznetsk: [s.n.]. pp. 314–317.
5. Kartashov, Yu.M., Matveev, B.V., & Mikheev, G.V. (1979) *Prochnost' i deformiruemost' gornykh porod* [Strength and Deformability of Rocks]. Moscow: Nedra.
6. Turchaninov, I.A., Iofis, M.A. & Kasparyan, E.V. (1989) *Osnovy mekhaniki gornykh porod* [Fundamentals of Rock Mechanics]. Leningrad: Nedra.
7. Gritsko, G.I., Vlasenko, B.V. & Posokhov, G.E. (1980) *Prognostirovanie i raschet proyavleniy gornogo davleniya* [Forecasting and Calculation of Manifestations of Mountain Pressure]. Novosibirsk: Nauka.
8. Stavrogin, A.N. & Protosenya, A.G. (1979) *Plastichnost' gornykh porod* [Plasticity of Rocks]. Moscow: Nedra.
9. Tsvetkov, A.B. & Pavlova, L.D. (2015) *Adaptatsiya algoritma metoda konechnykh elementov k sisteme simvol'noy matematiki* [Adaptation of the algorithm of the finite element method to the system of symbolic mathematics]. In: Fryanov, V.I. (ed.) *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov* [Science-intensive technologies for the development and use of mineral resources]. Novokuznetsk: [s.n.]. pp. 121–125.
10. Tsvetkov, A.B., Pavlova, A.B. & Fryanov, V.N. (2017) Numerical simulation of geomechanical state of coal massif in the vicinity of underground workings in the superimposed seams. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 84(012005). [Online] Available from: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/84/1/012005/pdf> (Accessed: 22nd March 2022). DOI: 10.1088/1755-1315/84/1/012005
11. Tsvetkov, A.B., Pavlova, L.D. & Fryanov, V.N. (2020) *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2020618419. Programma chislennogo issledovaniya matematicheskoy modeli deformirovaniya geomassiva s uchetom raznomodul'nosti gornykh porod* [Certificate of state registration of the program for computers No. 2020618419. Program for numerical study of mathematical model of geomassival deformation taking into account rock modularity]. Computer Program Register. Registration Date 27.07.2020
12. Stumpf, G.G. (1994) *Fiziko-tekhnicheskie svoystva gornykh porod i ugley Kuznetskogo basseyna* [Physical and Technical Properties of Rocks and Coals of the Kuznetsk Basin]. Moscow: Nedra.

Информация об авторе:

Цветков Андрей Борисович – доцент, доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и информатики Института информационных технологий и автоматизированных систем Сибирского государственного индустриального университета (Новокузнецк, Россия). E-mail: atsvet@mail.ru

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Tsvetkov Andrey B. (Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Applied Mathematics and Informatics, Institute of Information Technologies and Automated Systems, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russian Federation). E-mail: atsvet@mail.ru

The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию 16.04.2022; принята к публикации 30.08.2022

Received 16.04.2022; accepted for publication 30.08.2022

Научный журнал

**ВЕСТНИК
ТОМСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

**УПРАВЛЕНИЕ,
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА**

**TOMSK STATE UNIVERSITY
JOURNAL OF CONTROL AND COMPUTER SCIENCE**

2022. № 60

Редактор Е.Г. Шумская
Оригинал-макет Е.Г. Шумской
Редакторы-переводчики: Г.М. Кошкин; В.Н. Горенинцева
Дизайн обложки Л.Д. Кривцовой

Подписано к печати 30.09.2022 г. Формат 60х84¹/₈.
Гарнитура Times. Усл. печ. л. 14,0.
Тираж 250 экз. Заказ № 5161. Цена свободная.

Дата выхода в свет 13.10.2022 г.

Журнал отпечатан на полиграфическом оборудовании
Издательства Томского государственного университета
634050, г. Томск, Ленина, 36
Тел. 8(382-2)–52-98-49; 8(382-2)–52-96-75
Сайт: <http://publish.tsu.ru>; E-mail: rio.tsu@mail.ru