

УДК 622.862.3: 622.831.312: 004.42

А.И. Слащев

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, г. Днепропетровск, Украина

## ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

A.I. Slashchev

M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under NAS of Ukraine, Dnipropetrovsk, Ukraine

## JUSTIFICATION OF THE PARAMETERS OF THE INFORMATION SYSTEM ASSURING THE UNDERGROUND MINING SAFETY

**Цель.** Обосновать параметры и разработать программную структуру информационной системы обеспечения безопасности ведения подземных горных работ с учетом комплексной оценки, оперативного прогнозирования и предполагаемых сценариев развития геомеханических процессов.

**Методика.** Проект информационной системы разработан с применением методологии построения программных моделей вычислительных процессов, математическое моделирование геомеханических процессов выполнено с применением законов физики горных пород и механики сплошных сред.

**Результаты.** Обоснованы параметры и разработана структура новой информационной системы обеспечения безопасности ведения подземных горных работ по геомеханическому фактору, которая включает: подсистему, обеспечивающую на базе сетевых технологий и технических средств мобильной связи эффективное управление персоналом на промышленных предприятиях; справочно-информационную подсистему поддержки принятия решений, обеспечивающую сбор данных, предоставление сведений по запросам, первичный анализ нормативно-технической документации, поиск обоснованных параметров процессов с помощью блока анализа; диалоговую подсистему оценки безопасности горных работ по геомеханическому фактору, учитывающую синтез алгоритмов оценки объекта управления на основе математического аппарата нечеткой логики, оперативного прогнозирования и предполагаемых сценариев развития геомеханических процессов на базе локальных моделей состояния массива пород. Безопасность работ обеспечивается путем повышения эффективности взаимодействия персонала, дисциплинарной ответственности, а также оперативного прогнозирования состояния массива пород и принятия заблаговременных решений по поддержанию выработок в безаварийном состоянии.

**Научная новизна.** Разработана методика построения информационной системы обеспечения безопасности ведения подземных горных работ, отличающаяся учетом оперативного прогнозирования и сценариев развития геомеханических процессов.

**Практическая значимость.** Использование в горном производстве разработанной информационной системы позволяет повысить эффективность и безопасность ведения работ путем обеспечения передачи и записи оперативной информации в процессе контроля выполнения текущих задач, а также оперативного реагирования при возникновении, развитии и ликвидации аварийных ситуаций, вызванных, в том числе, и геомеханическими факторами.

**Ключевые слова:** *безопасность горных работ, информационная система, моделирование, геомеханика*

**Постановка проблемы.** По прогнозам компании British Petroleum запросы на уголь в мировом масштабе к 2030 году увеличатся на 39%. Несмотря на то, что этот рост в основном коснется стран, не входящих в состав Международной экономической организации развитых стран OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development), уголь в ближайшее десятилетие продолжит завоевывать новые позиции на энергетическом рынке. Украина отстает от большинства стран в объемах потребления угля, которое в перерасчете на одного жителя меньше, чем в Германии в четыре раза, а в Польше – более, чем в три раза, в США и ЮАР – почти в два раза [1]. Эти тенденции стремительного роста энергопотребления требуют повышения эффективности добычи угля на шахтах Украины, которые, в свою очередь, относятся к предприятиям с особо опасными условиями эксплуатации.

Высокая опасность труда на шахтах объясняется, прежде всего, объективными горно-геологическими условиями, так как добыча угля осуществляется на большой глубине (зачастую более 1000 метров) в условиях слабых обрушающихся и/или выбросоопасных вмещающих пород. Остаются высокими аварийность и травматизм от геомеханических и газодинамических факторов: внезапных обрушений и вывалов пород, горных ударов, выбросов породы и газа, достигающий, в совокупности, 30–50% от общего числа пострадавших. Эти явления реализуются в виде неуправляемых деформаций породных массивов, разрушений крепи и завалов выработок.

Усилиями ряда академических институтов и университетов разработаны и внедряются в производство новые способы получения и методы первичной обработки информации о состоянии породного массива, технологического процесса, оборудования, вентиляции, а также локализации персонала [2]. Однако, несмотря на наличие большого объема исходных данных, получаемых от систем мониторинга и персонала, как показала статистика,

их недостаточно для обеспечения принятия верных решений по безопасности с учетом геомеханического фактора. Основным препятствием эффективного управления горными процессами является несогласованность информативных параметров мониторинга среды с алгоритмами оценки, прогноза и сценариями развития событий.

**Цель.** Обосновать параметры и разработать программную структуру информационной системы обеспечения безопасности ведения подземных горных работ с учетом комплексной оценки, оперативного прогнозирования и предполагаемых сценариев развития геомеханических процессов.

**Изложение основного материала.** Опыт эксплуатации потенциально опасных объектов управления (например, атомных электростанций) показал, что наиболее эффективными способами обеспечения безопасности такого объекта являются: обработка первичных информативных параметров состояния объекта в режиме реального времени, многоступенчатый контроль процессов и персонала с выделением обобщенных показателей безопасности, прогнозирование процессов с привлечением баз знаний и моделей, отработка сценариев развития ситуаций. То есть, наиболее эффективная система безопасности на промышленных предприятиях может быть построена только на основе современных информационных систем.

Разработана информационная система обеспечения безопасности (ИСОБ) ведения подземных горных работ по геомеханическому фактору, которая спроектирована исходя из концепции диалоговых компьютерных систем поддержки принятия решений (Decision Support Systems, DDS) с использованием элементов экспертных систем. Концепция DDS предусматривает интеграцию и анализ данных из многих источников для обеспечения персонала предприятия своевременной информацией, необходимой для принятия управленческих решений. Основные положения этой концепции – централизация обработки информации в едином вычислительном центре, использование аппаратных и программных средств обработки данных в целях оптимизации управления производством, сокращения персонала и накладных расходов.

Элементы экспертной системы в ИСОБ служат для анализа данных и выдачи консультативной информации, включающей оценку состояния геомеханической системы и выработку критериев уровней опасности на основе математического аппарата нечеткой логики. Главным достоинством элементов экспертной системы является накопление знаний (например, типичных горно-геологических условий или локальных моделей стандартного поведения породного массива), сохранение их в базе данных и выдача персоналу в случае необходимости принятия решений в аналогичных ситуациях. В отличие от субъективности персонала, экспертная система к любой информации подходит обоснованно, что улучшает качество анализа данных. Такой симбиоз концептуального построения системы способствует повышению эффективности и безопасности работы предприятия.

ИСОБ состоит из трех основных подсистем: подсистемы управления персоналом, справочно-информаци-

онной подсистемы поддержки принятия решений и диалоговой подсистемы оценки безопасности горных работ по геомеханическому фактору, рис. 1. Первая подсистема представляет собой базовое компьютерное клиент-серверное программное обеспечение, которое предназначено для повышения эффективности и безопасности ведения работ путем обеспечения проводной и беспроводной передачи оперативной информации, контроля над выполнением текущих задач, а также реагирования при возникновении, развитии и ликвидации аварий, вызванных, в том числе, геомеханическими факторами.

Горные предприятия имеют свою специфику управления, отличающуюся значительным количеством работников, необходимостью управления сложным горно-техническим оборудованием, большой вероятностью аварийных ситуаций, удаленностью руководителей среднего и высшего звеньев от производственных площадок. При этом задача повышения дисциплины и исполнительности сотрудников на производстве является приоритетной и выполнима при должном контроле исполнения выданных ИТР приказов и распоряжений. Передача аудиоинформации решена телефонизацией, однако на удаленных объектах, где выполняются ответственные работы, телефонная связь может отсутствовать. Кроме того, устные недокументируемые распоряжения достаточны при решении задач малой или средней сложности и только в небольших коллективах. Вместе с тем, даже в таких коллективах существует возможность неоднозначного толкования смысла устных распоряжений как отдающим распоряжение, так и получающим его. Может возникнуть расхождение между тем, что руководитель хотел сказать, и как сказал на самом деле; как подчиненный понял и что принял к исполнению.

Кроме того, работнику может срочно понадобиться техническая информация: горно-геологический разрез, карта выхода водоносных горизонтов, принципиальные схемы оборудования, технологические планы разработок и др., что предопределяет необходимость передачи не только письменных распоряжений, но и визуальных данных.

С целью снижения влияния субъективности человеческого фактора при принятии решений в подсистеме управления персоналом реализованы функции контроля над постановкой задач руководителями и выполнением работ исполнителями. При этом организация управления информационными потоками при постановке производственного задания предусматривает не только устное разъяснение задачи, но и фиксацию в электронном виде текстового описания заданий и сроков их выполнения, передачу персоналу поясняющих изображений, дополнительных требований и инструкций, рис. 2.

Удаленный друг от друга персонал подразделений предприятия взаимодействует путем использования эмуляторов программ-клиентов на мобильных устройствах, подключенных через локальные и глобальные сети.

Оперативное реагирование на происходящие события помогает персоналу принимать соответствующее решение в более сжатые сроки. Для этого подсистема управления персоналом обладает рядом особых свойств:

расширяемостью и адаптивностью к изменившимся условиям; способностью к трансформации управленческих функций в сложных ситуациях; низкой централизацией для обеспечения своевременного ситуационного

реагирования на возникающие проблемы; сильными интеграционными свойствами, позволяющими концентрировать усилия персонала на наиболее важных направлениях.

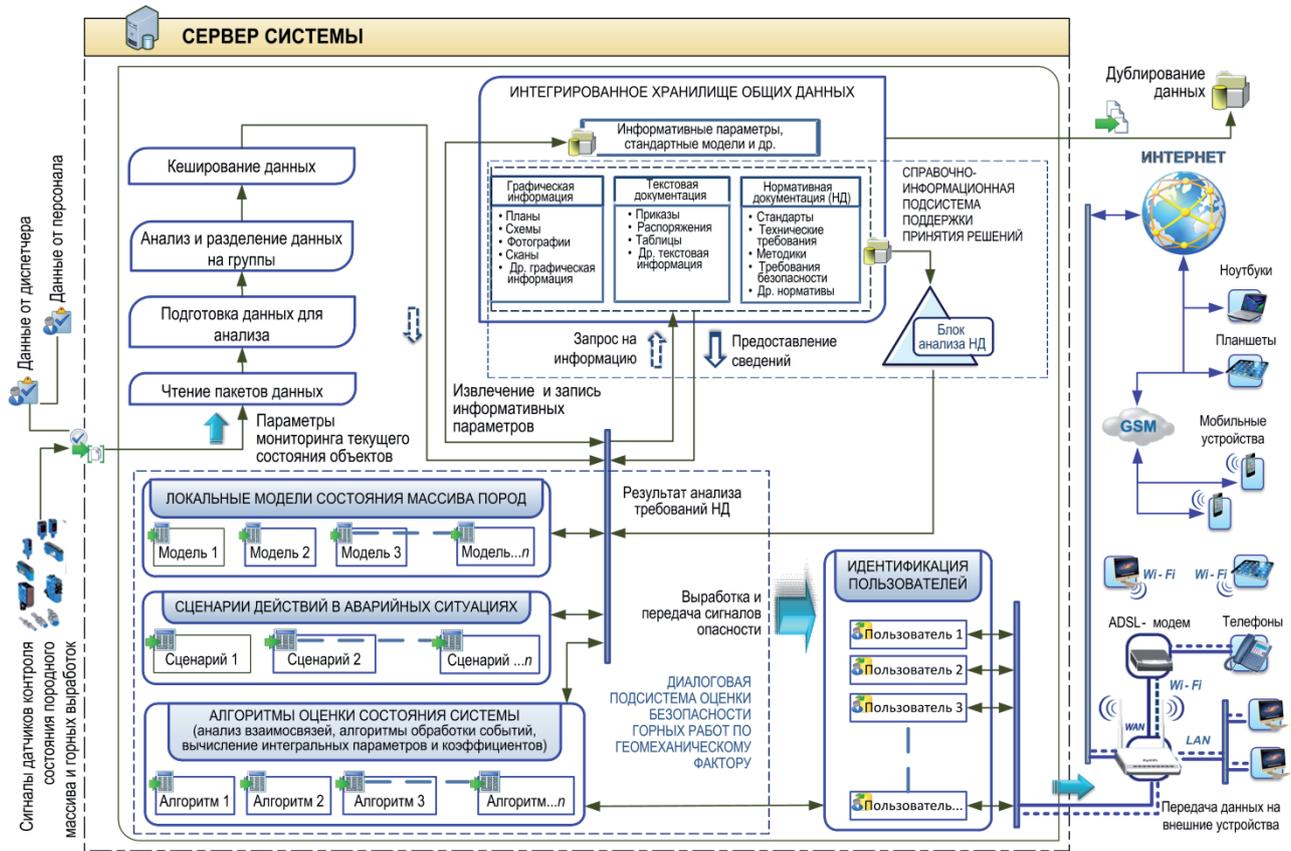


Рис. 1. Функциональная схема информационной системы обеспечения безопасности ведения горных работ по геомеханическому фактору



Рис. 2. Постановка производственного задания

Сервер управляет клиентом с помощью удаленных вызовов. То есть используется технология „тонкий клиент“ (thin client). В результате использования этой технологии в сетях с клиент-серверной архитектурой большая часть задач по обработке информации переносится на сервер, на который клиент может делегировать задачу на выполнение каких-либо функций или расчетов. Эта технология обладает повышенной надежностью, которая обеспечивается: устойчивостью к сбоям, так

как все изменения вносятся на сервере и поступают всем пользователям одновременно; отсутствием проблем при отключении электроэнергии, так как вся информация хранится на сервере, который имеет устройства бесперебойного питания; высокой безопасностью системы, так как на браузерах клиентов информация минимальна (несмотря на то, что терминалы могут находиться далеко друг от друга, например, в разных городах), а разграничение прав доступа производится системными средствами на хорошо защищенном сервере; возможностью параллельного включения дублирующего сервера.

Управление информационными потоками в системе производится следующим образом.

Изначально при включении сервера создается экземпляр класса „ByteServer“, который ожидает подключения клиента (нет соединения сети), рис. 3.

На стороне клиента:

- создается экземпляр класса „ByteClient“;
- вызывается метод „connection“ и делаются попытки подключения к серверу;
- если попытка подключения удалась, то устанавливается двунаправленная связь между клиентом и сервером.

После установки связи создается экземпляр класса „ByteUser“, который является представителем клиента на сервере. При этом каждый вновь присоединенный клиент получает свой экземпляр класса „ByteUser“, ко-

торый идентифицирует этого клиента. В классе „ByteUser“ хранится и обрабатывается информация о данных клиента и других параметрах, связанных с пользователем.

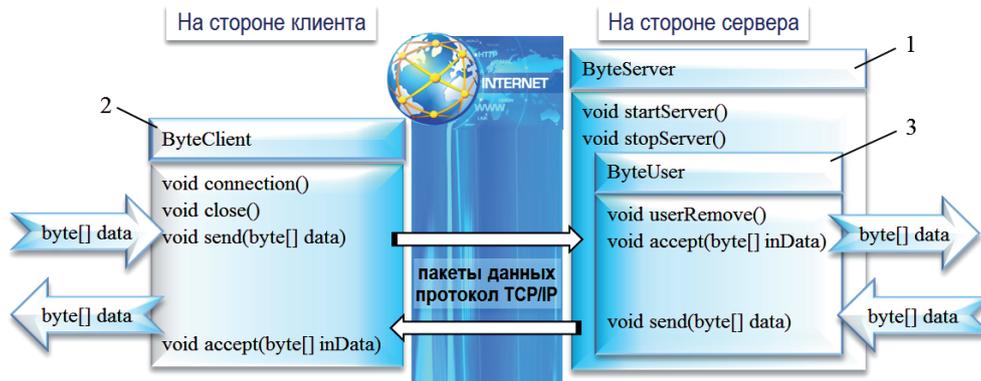


Рис. 3. Управление информационными потоками при соединении и авторизации пользователей: 1 – включение сервера; 2 – соединение с клиентским устройством; 3 – идентификация пользователя в сети

Удаленный вызов метода сервером производится через интернет асинхронно (сервер не ждет от клиента результата запроса). Информационные потоки передаются байтами, которыми представляются объекты. Технология передачи данных следующая:

- вызов метода, генерирующего сообщение (в нем содержатся имя и параметры метода);
- сериализация сообщения (превращение объектов в байтовые массивы);
- передача сообщения (выполняется пакетами данных с использованием протоколов TCP/IP, Transmission Control Protocol/Internet Protocol);
- десериализация сообщения (восстановление начального состояния структуры данных из байтовых массивов в объекты);
- поиск метода и его выполнение производится с использованием рефлексии (от лат. reflexio – „обращение назад“), способе, когда программа анализирует сама себя и выполняет свои функции.

Такой способ проектирования информационных потоков имеет большие преимущества, так как позволяет делать код модульным и распределенным. Это имеет огромное значение в больших распределенных системах.

В ряде случаев показателями безопасности труда является соблюдение стандартов и правил, разрабатываемых внутри организации на основе отраслевых и других документов [3], что потребовало дополнения ИСОБ второй диалоговой справочно-информационной подсистемой для обработки и анализа нормативно-технической и другой документации. Функциональные возможности справочно-информационной подсистемы поддержки принятия решений определяются ее основными задачами: сбором данных, предоставлением сведений клиентам по соответствующим запросам, первичным анализом нормативно-технической документации и обработкой материалов для дальнейшего хранения, поиском обоснованных параметров процессов с помощью блока анализа.

Третья диалоговая подсистема оценки безопасности горных работ по геомеханическому фактору использует информационный уровень поддержки принятия реше-

ний с применением отдельных моделей и методов. Представляет собой систему поддержки принятия решений с элементами экспертных знаний, которая использует, как шаблоны, правила принятия решений и геомеханические модели локальных состояний горных пород. Получение геомеханических параметров процесса разрушения необходимо для определения накопления повреждений в геотехнической системе и оценки состояния пород с целью предупреждения и предотвращения работы в аварийных режимах. При этом устанавливаются причинно-следственные связи между показателями изменения свойств элементов системы под влиянием различных факторов и характеристиками ее работы, которые, в свою очередь, изменяются в зависимости от технических параметров системы и физико-механических свойств пород [4]. Подсистема поддерживает принятие самостоятельных решений руководящими инженерно-техническими работникам с учетом их личного опыта.

Для оценки геомеханического состояния породного массива вокруг горных выработок математическая модель определена следующим образом. Рассматривается горная порода с хаотически расположенными порами и трещинами, для которой принимается допущение, что характеристика структуры породы внутри некоторого объема (в пределах одного конечного элемента) однородна, а поле параметров – гладкое и может нарушаться только на поверхностях разрыва. Технология расчета математической модели методом конечных элементов (МКЭ) включает: формирование схемы узлов и разделение исследуемого участка массива на элементы; построение матрицы жесткости системы путем установления зависимостей между силами и перемещениями в узлах элементов (задание закона перемещений в соответствии с принятым законом, выражение компонент деформаций и напряжений через неизвестные параметры, определение жесткостных характеристик элементов); составление системы уравнений, определяющих совместимость деформаций исследуемого объекта, их решение и вычисление значений перемещений в расчетных узлах; определение компонент напряженно-деформированного состояния (НДС) рассчитываемой системы на

основе найденных значений перемещений узлов [5]. В пределах каждого элемента расчетной схемы физическая модель остается сплошной и непрерывной. Параметры физико-механических свойств каждого элемента задают на основе механических гипотез, а искомые силы и перемещения – из условия кинематической совместимости системы.

Для двумерной задачи (справедлива для протяженных выработок) матрица значений неизвестных узловых перемещений формируется из вектора рассчитанных МКЭ перемещений узлов  $\{u\}$

$$[u^{xy}] = [u_j^x, u_j^y] \leftarrow \{u\} \Big|_{i++ j++}, \quad (1)$$

где  $\{u\} = \{u_k^x, u_l^x, u_m^x, u_k^y, u_l^y, u_m^y\}_i \leftarrow [K]^{-1} \{F\} \Big|_{i++}$ ;  $K$  – матрица жесткости системы (Matrix Stiffness of Systems);  $\{F\}$  – вектор сил системы;  $i++, j++$  – инкременты, нарастающие индексы массивов до числа элементов или до числа узлов соответственно;  $k, l, m$  – индексы узлов с координатами  $x$  и  $y$ , окружающих  $i$ -ый элемент.

Массивы значений главных упругих напряжений  $[\sigma]$  и деформаций  $[\varepsilon]$  вычисляются по соотношениям

$$[\sigma] = [\sigma_1, \sigma_3] = 0,5 \left( (\sigma_i^x + \sigma_i^y) \pm \sqrt{(\sigma_i^x - \sigma_i^y)^2 + 4\tau_i^2} \right) \Big|_{i++};$$

$$[\varepsilon] = [\varepsilon_1, \varepsilon_3] = 0,5 \left( (\varepsilon_i^x + \varepsilon_i^y) \pm \sqrt{(\varepsilon_i^x - \varepsilon_i^y)^2 + 4\gamma_i^2} \right) \Big|_{i++}, \quad (2)$$

где  $\tau$  – касательные напряжения;  $\gamma$  – деформации поперечного сдвига;  $\sigma_1, \sigma_3, \varepsilon_1, \varepsilon_3$  – максимальные и минимальные главные напряжения и деформации.

При сооружении и эксплуатации подземных горных выработок возникают зоны неупругих деформаций, отличающиеся наличием значительного количества дополнительных систем трещин, в которых происходят подвижки по контактам структурных элементов пород с формированием плоскостей скольжения и трещин отрыва. Характер разрушения пород, расположение относительно выработки и распространенность зон неупругих деформаций определяют интенсивность деформирования горных выработок и являются важнейшим фактором, от которого зависит риск вывалов и обрушений горных пород.

Под разрушением понимают состояние прогрессирующего увеличения смещений и деформаций, характеризующееся объемным, часто неконтролируемым, перемещением пород в горную выработку. В свою очередь, устойчивость породного массива и его способность противостоять внешней нагрузке, в значительной степени, зависит от соотношений напряжений, действующих в массиве, к прочностным и деформационным свойствам пород. Разрушение горных пород зависит от величины и скорости приложения нагрузки, напряженного состояния пород, их прочности и структуры.

Неупругие деформации горных пород возникают в результате микроскольжений внутри их поликристаллической структуры. Превышение внешними напряжениями цементирующих связей достаточно точно описано критерием Кулона-Мора

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi + C, \quad (3)$$

где  $\sigma_n$  – напряжение, нормальное к площадке сдвига;  $\varphi$  – угол внутреннего трения;  $C$  – сцепление.

Если предельное условие выполнено, то оценка НДС массива пород и зон неупругих деформаций определяется путем совмещения МКЭ с итерационной процедурой метода начальных напряжений [5].

Массив осевых фактических напряжений для зоны неупругого деформирования на  $n$ -ой итерации

$$[\sigma^{\text{fact}}]_n = \begin{cases} \sigma_i^{x \text{ fact}} = \sigma_1^{\text{fact}} \cos^2 \alpha + \sigma_3^{\text{fact}} \sin^2 \alpha \\ \sigma_i^{y \text{ fact}} = \sigma_1^{\text{fact}} \sin^2 \alpha + \sigma_3^{\text{fact}} \cos^2 \alpha \\ \tau_i^{\text{fact}} = 0,5 (\sigma_1^{\text{fact}} - \sigma_3^{\text{fact}}) \sin 2\alpha \end{cases} \Big|_{i++}, \quad (4)$$

где  $\sigma_1^{\text{fact}}, \sigma_3^{\text{fact}}$  – максимальные и минимальные главные напряжения, которые имела бы реальная порода при рассчитанных теоретических деформациях для параболической функции снижения прочности при разупрочнении пород

$$\{\sigma_1^{\text{fact}}\} = \sigma_{1_i}^{\text{lim}} - \left( \frac{\varepsilon_{1_i} - \varepsilon_{1_i}^{\text{lim}}}{(k_i - 1)\varepsilon_{1_i}^{\text{lim}}} \right)^2 (\sigma_{1_i}^{\text{lim}} - \sigma_{1_i}^{\text{res}}) - \varepsilon_{1_i}^{\text{lim}} \Big|_{i++}; \quad (5)$$

$$\{\sigma_3^{\text{fact}}\} = \frac{E_i (\varepsilon_{1_i} + \varepsilon_{1_i} \operatorname{ctg} \xi) + 2C_i \operatorname{ctg} (45 - \varphi_i / 2) (v_i - 1)}{(1 - v_i) (1 + \operatorname{ctg} \xi)} \Big|_{i++},$$

где  $\sigma_{1_i}^{\text{lim}}, \sigma_{1_i}^{\text{res}}, \varepsilon_{1_i}^{\text{lim}}, \varepsilon_{1_i}^{\text{res}}$  – предельные и остаточные максимальные главные напряжения и деформации;  $k$  – коэффициент, характеризующий степень хрупкости породы;  $E$  – модуль упругости, МПа;  $\operatorname{ctg} \xi$  – параметр, определяющий закон пластического течения;  $v$  – коэффициент Пуассона.

В результате решения задачи определяются узловые смещения и силы, значения осевых деформаций, главных и касательных напряжений для каждого элемента модели. Полученные базовые информативные параметры НДС породного массива используются для получения интегральных информативных параметров, которые характеризуют деформации и разрушения пород под действием горного давления, табл. 1.

Расчеты изменений этих параметров обеспечивают возможность определения исходных данных для выработки критериев оценки опасности породного массива (в том числе с применением математического аппарата нечеткой логики) по геомеханическому фактору, включающему оценку зон локальных разрушений пород, смещений и подвижек кровли, почвы и боков выработок с учетом средств и способов их поддержания.

Технология компьютерного анализа геомеханического состояния породного массива реализована в программном комплексе ИГТМ НАНУ «GEO-RS» и предназначена для моделирования геомеханических процессов в сложноструктурном породном массиве. Информационная система состоит из специализированных компьютерных программ, включающих обширную базу данных физико-механических свойств горных пород для различных горно-геологических условий отработки угольных пластов.

Отличительными особенностями программного комплекса являются обеспечение расчетов упругого, упругопластического и различных видов запредельных напряженно-деформированных состояний структурно-не-

однородного породного масива, а також урахування розриву і сколювання шарів порід, особливостей і закономірностей протікання деформаційних процесів в тріщинуватому водо- і газонасиченому породному масиві. Програма застосовується для аналізу стійкості обнажених масивів горних порід, оперативного прогнозу геомеханічних процесів, що, в свою чергу, є основою для прийняття рішень по забезпеченню необхідної безпеки ведення горних робіт по геомеханічному фактору.

Прогнозовані деформації і переміщення контура горних виробіток отримують з результатів рішення серій задач, пов'язаних однотипними граничними умовами (наприклад, змінюють тільки прочнісні властивості для елементів моделі, описуваних водонасиченою породою, виконують рішення до і після водонасичення). На цьому принципі заснована методика передвиробничого розрахунку локальних геомеханічних моделей, які характеризують серії постійних горних порід навколо виробіток при різних горно-геологічних і горнотехнічних умовах.

Задача управління горним тиском пов'язана з цілеспрямованим зниженням напружень і деформацій в породному масиві навколо виробітки з допомогою відомих або принципово нових способів охорони і підтримки горних виробіток. Для прикладу визначимо вплив анкерування і проведення розгрузочних щелей в боках виробітки на НДС порід і стійкість

виробітки в цілому, проведеної на глибині 1250 м, рис. 4.

Таблиця 1

Исходные данные и критерии оценки опасности породного массива по геомеханическому фактору

Параметр, использование	Обозн.	Ед. изм.
Полные смещения узлов модели. Оценка смещений контура выработок и приконтурных участков массива пород	$u^{xy}$	м
Изменения главных напряжений во времени. Оценка зон концентрации напряжений и разгрузки участков породного массива	$\Delta\sigma_1^t$	МПа
Интенсивность изменения напряжений. Оценка возможности внезапных обрушений	$d\sigma_1/dt$	МПа/сут
Тип разрушения. Выявление зональности локальных разрушений породного массива	attribute	признак
Объемы зон неупругих деформаций. Оценка объемов разрушений пород и прогноз нагрузок на крепи	$V$	м <sup>3</sup>
Изменение объемов зон неупругих деформаций. Оценка сценариев развития разрушений пород при принятии решений по поддержанию горных выработок	$\Delta V^t$	м <sup>3</sup>
Объемы зон разрыва сплошности. Оперативное прогнозирование зон обрушений горных пород	$V_{тен}$	м <sup>3</sup>

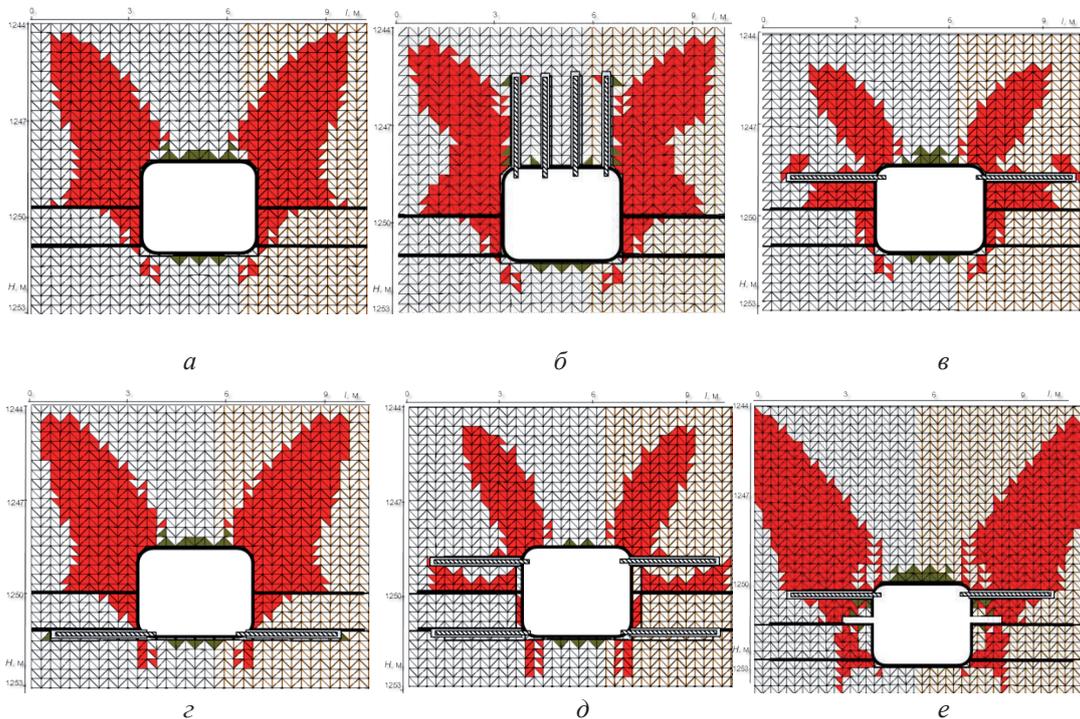


Рис. 4. Прогнозирование разрушений горных пород вокруг выработок при различных способах крепления: а – без дополнительного крепления; б – анкеры в кровле; в – анкеры в боках сверху; г – анкеры в боках снизу; д – анкеры в боках сверху и снизу; е – анкеры в боках и разгрузочные щели; ■ – зоны разрушений от сдвигающих напряжений; ■ – зоны разрывных нарушений

Первоначально для возможности сравнения воздействия способов крепления на устойчивость породного массива был проведен расчет напряженно-деформиро-

ванного состояния пород вокруг выработки без дополнительного крепления, рис. 4, а, после чего выполнена серия расчетов при размещении анкеров в кровле, боках

и возле почвы выработки. Так как разрушение пород в верхней части выработки больше, то анкеры, расположенные по бокам сверху выработки, оказали на состояние вмещающих пород существенное влияние, рис. 4, б. Вместе с тем, анкеры, расположенные по бокам выработки возле почвы в зоне наименьших деформаций, картину разрушений практически не изменяют, рис. 4, а, в. Расположение анкеров по бокам выработки возле кровли (в зоне больших деформаций) приводит к уменьшению неупругих сдвиговых деформаций над анкерами на 24% и смещений кровли на 4%. Зона разрывных нарушений в режиме растяжения по объему не изменяется, но углубляется и концентрируется в центре кровли, при этом состоянии почвы выработки не улучшается. Анкерование по нижним бокам выработки (в зоне наименьших деформаций) оказалось бесполезным, так как их применение не улучшило состояние выработки.

Несмотря на кажущуюся бесполезность анкерования для данных условий нижней части выработки, при соединении верхних анкеров, расположенных возле кровли, и нижних, расположенных возле почвы, кардинально улучшается НДС кровли и боков выработки, рис. 4, д. Этот способ оказывается эффективным в плане повышения устойчивости кровли путем крепления боков выработок. Происходит дополнительное уменьшение смещений кровли (относительно анкерования без соединения) еще на 8%, неупругих сдвиговых деформаций – на 9%. Зона разрывных нарушений в кровле сокращается в три раза. Следует отметить, что состояние почвы выработки, как и раньше, не улучшилось.

Для улучшения состояния почвы выработки, оставив анкера возле кровли с целью ее укрепления, дополнительно в боках над угольным пластом были смоделированы разгрузочные щели, рис. 4, е. Разгрузочные щели способствуют смещению максимумов напряжений вглубь массива в нижней части выработки. При этом в 2,5 раза увеличилась нагрузка на анкеры в верхней части выработки, что кардинально улучшило состояние почвы и несколько ухудшило состояние кровли. Исчезла зона разрывных нарушений в почве, смещение почвы стало нулевым. Однако, зона разрывных нарушений в кровле выросла на 67%, зона неупругих сдвиговых деформаций увеличилась на 40%. В результате состояние почвы хорошее, но возникла необходимость в дополнительном креплении кровли.

Рост деформаций при увеличении нагрузки происходит следующим образом. Первоначально происходят очаговые сдвиговые деформации в углах кровли и в верхней части боков выработки на сопряжении аргиллита с угольным пластом. При дальнейшем нагружении происходит рост деформаций, сдвиг и формирование сплошной зоны неупругих деформаций пород от угла кровли до угольного пласта. Практически вся верхняя часть боков выработки возле обнажения подвергается сдвиговым нарушениям, которые только начинают прорастать вглубь массива. В кровле деформации разрывные и расположены в центре, в почве – незначительные единичные сдвиговые деформации по краям выработки. Следует отметить, что при анкерования кровли деформации образуются не в ее центре, а в уг-

ловых частях, что иногда вызывает вывалы углов выработки, рис. 5.

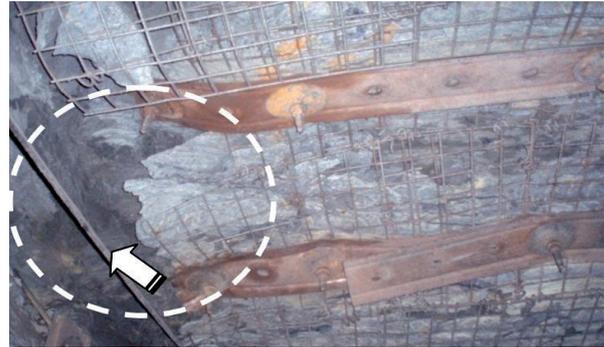


Рис. 5. Вывалы углов выработки (шахта Самарская)

Для прогнозирования опасных состояний пород вокруг выработки предложено использовать ряд информативных параметров, полученных на основе расчетов объемов нарушенных трещинами и полностью разрушенных пород в зонах неупругих деформаций (табл. 2), интенсивности доминирующих смещений контура горных выработок.

Таблица 2

Оценка опасных состояний породного массива путем расчета объемов разрушенных зон

Вариант модели	Объемы зон разрушенных пород, м <sup>3</sup> на 1 п.м. длины выработки					
	Всего в кровле		Всего в почве		В створе выработки	
	Разрыв, $V_{тен}^{кр}$	Сдвиг, $V^{кр}$	Разрыв, $V_{тен}^{поч}$	Сдвиг, $V^{поч}$	Вывалы $\frac{V_{S_{тен}}^{кр}}{V_{S}^{кр}}$	Пучение $\frac{V_{S_{тен}}^{поч}}{V_{S}^{поч}}$
Исходное состояние, без дополнительного крепления	0,54	28,98	0,27	0,45	$\frac{0,54}{2,34}$	$\frac{0,27}{0,45}$
Анкеры в кровле	0,36	17,46	0,27	0,45	$\frac{0,36}{0,9}$	$\frac{0,27}{0,45}$
Анкеры в боках сверху	0,54	17,19	0,27	0,54	$\frac{0,54}{2,25}$	$\frac{0,27}{0,54}$
Анкеры в боках снизу	0,27	28,98	0,27	0,45	$\frac{0,54}{2,34}$	$\frac{0,27}{0,72}$
Анкеры в боках сверху и снизу	0,18	15,93	0,27	1,08	$\frac{0,18}{2,43}$	$\frac{0,27}{1,08}$
Анкеры в боках и разгрузочные щели	0,9	34,83	0,0	0,09	$\frac{0,90}{0,81}$	$\frac{0,00}{0,18}$

Оценочными критериями риска обрушений также являются соотношения смещений кровли выработки с податливостью крепи и веса обрушенных пород в створе выработки с несущей способностью средств крепления. Очевидно, что крепь должна быть способной по своим конструктивным параметрам компенсировать смещения контура выработки и вес обрушенных пород, иначе она окажется в нерабочем состоянии. Например, при прогнозируемых смещениях более 500 мм крепь МПК-А3 применять опасно, так как ее податливость 300 мм, что меньше нижней границы смещений. Выход одного параметра системы за пределы регламентов увеличивает риск возникновения аварийной ситуации и снижает показатели надежности системы, а сумма отдельных нарушений существенно увеличивает вероятность аварии. То есть, обеспечение безопасности по геомеханическому фактору – это полностью нормальный режим работы

производственного процесса по добыче угля, обеспеченный устойчивостью системы „крепь – породный массив“.

Таким образом, синтез алгоритмов оценки и оперативного прогнозирования геомеханических процессов позволяет инженерно-техническому персоналу принять заблаговременные решения по поддержанию горных выработок в безаварийном состоянии.

**Выводы.** С применением методологии построения программных моделей информационных процессов обоснованы параметры и разработана архитектура новой информационной системы обеспечения безопасности ведения подземных горных работ по геомеханическому фактору, которая включает:

- подсистему, обеспечивающую, на базе сетевых технологий и мобильных технических средств, эффективное управление персоналом на промышленных предприятиях;

- справочно-информационную подсистему поддержки принятия решений, обеспечивающую сбор данных, предоставление сведений по запросам, первичный анализ нормативно-технической документации, поиск обоснованных параметров процессов с помощью блока анализа;

- диалоговую подсистему оценки безопасности горных работ по геомеханическому фактору, учитывающую синтез алгоритмов оценки объекта управления на основе математического аппарата нечеткой логики, оперативного прогнозирования и сценариев развития геомеханических процессов на базе локальных моделей состояния массива пород.

Безопасность работ обеспечивается путем повышения эффективности взаимодействия персонала, дисциплинарной ответственности, уровня контроля руководителей производственных процессов, а также оперативного прогнозирования состояния массива пород и принятия заблаговременных решений по поддержанию выработок в безаварийном состоянии.

### Список литературы / References

1. Официальный сайт мировой угольной ассоциации [Электронный ресурс] // „Мировая угольная промышленность“. – Режим доступа: <http://www.worldcoal.org/coal-energy-access/the-global-energy-challenge>.

Sporton, B., 2012. *The Global Energy Challenge*, [Online], Word Coal Association. Available at: <http://www.worldcoal.org/coal-energy-access/the-global-energy-challenge> (Accessed 18 Feb. 2013).

2. Стоецкий В.Ф. Оценка риска при авариях техногенного характера / В.Ф. Стоецкий, В.И. Голинько, Л.В. Дранишников // Научный вестник НГУ. – 2014. – №3. – С. 117–124.

Stoetskii, V.F., Golinko, V.I. and Dranishnikov, L.V. 2006. Risk assessment in man-caused accidents. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, pp. 117–124.

3. Attorney Amy DelPo, 2007. *The Performance Appraisal Handbook: Legal & Practical Rules for Managers*. NOLO.

4. Моделирование и контроль динамических процессов в задачах оценки состояния геотехнических си-

стем: монография / [Иконникова Н.А., Корсун В.И., Слещев А.И. и др.] // М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Днепропетровск: НГУ, 2015. – 279 с.

Ikonnikova, N.A., Korsun, V.A., Slashchev, A.I., Yalanskiy, Aleks.A. and Yalanskiy, A.A., 2015. *Modelirovaniye i kontrol dinamicheskikh protsessov v zadachakh otsenki sostoyaniya geotekhnicheskikh sistem* [Modeling and control of dynamic processes in assessments of the conditions of geotechnical systems]. Dnipropetrovsk: NGU.

5. Zienkiewicz, O.C. and Morgan, K., 2006. *Finite Elements and Approximation*. Dover Publications.

**Мета.** Обґрунтувати параметри та розробити програмну структуру інформаційної системи забезпечення безпеки ведення підземних гірничих робіт з урахуванням комплексної оцінки, оперативного прогнозування й передбачуваних сценаріїв розвитку геомеханічних процесів.

**Методика.** Проект інформаційної системи розроблений із застосуванням методології побудови програмних моделей обчислювальних процесів, математичне моделювання геомеханічних процесів виконане з використанням законів фізики гірських порід і механіки суцільних середовищ.

**Результати.** Обґрунтовані параметри та розроблена структура нової інформаційної системи забезпечення безпеки ведення підземних гірничих робіт за геомеханічним фактором, що включає: підсистему, яка забезпечує на базі мережевих технологій і технічних засобів мобільного зв'язку ефективне управління персоналом на промислових підприємствах; довідково-інформаційну підсистему підтримки прийняття рішень, що забезпечує збір даних, надання відомостей за запитом, первинний аналіз нормативно-технічної документації, пошук обґрунтованих параметрів процесів за допомогою блоку аналізу; діалогову підсистему оцінки безпеки гірничих робіт за геомеханічним фактором, що враховує синтез алгоритмів оцінки об'єкта управління на основі математичного апарату нечіткої логіки, оперативного прогнозування й передбачуваних сценаріїв розвитку геомеханічних процесів на базі локальних моделей стану масиву порід. Безпека робіт забезпечується шляхом підвищення ефективності взаємодії персоналу, дисциплінарної відповідальності, а також оперативного прогнозування стану масиву порід і прийняття завчасних рішень з підтримання виробок у безаварійному стані.

**Наукова новизна.** Розроблена методика побудови інформаційної системи забезпечення безпеки ведення підземних гірничих робіт, що відрізняється врахуванням оперативного прогнозування та сценаріїв розвитку геомеханічних процесів.

**Практична значимість.** Використання в гірничому виробництві розробленої інформаційної системи дозволяє підвищити ефективність і безпеку ведення робіт шляхом забезпечення передачі та запису оперативної інформації у процесі контролю виконання поточних завдань, а також оперативного реагування при виникненні, розвитку та ліквідації аварійних ситуацій, викликаних, у тому числі, і геомеханічними факторами.

**Ключові слова:** безпека гірничих робіт, інформаційна система, моделювання, геомеханіка

**Purpose.** Substantiation of the parameters and development of a program structure of the information system assuring the underground mining safety based on the comprehensive assessment, operational forecasting and prospective scenarios of geomechanical processes.

**Methodology.** The project of the information system was developed using the methodology of the design of program models of computational processes, mathematical modeling of geomechanical processes performed using the laws of physics of rocks and continuum mechanics.

**Findings.** The parameters and structure of the new information system for the underground mining safety control based on the geomechanical factors has been developed. It includes: the subsystem that provides effective personnel management at industrial enterprises based on network communications technologies and mobile telephony; reference and information subsystem of decision support, that provides data collection, information on request, the primary analysis of normative and technical documentation, search for reasonable process parameters via the analysis unit; interactive subsystem of mining operations safety assessment based on the geomechanical factor, which takes into account the synthesis of algorithms for evaluation of the control object based

on the mathematical apparatus of fuzzy logic, operational forecasting and prospective scenarios of geomechanical processes based on the state of local models of rock massifs. The safety is assured through the increase of the staff cooperation effectiveness, disciplinary liability, as well as through the operational forecasting of the rock massifs state and making early decisions on the maintenance of workings in the accident-free state.

**Originality.** The technique of design of the information system for the underground mining safety control has been developed. It takes into account the operational forecasting and prospective scenarios of geomechanical processes.

**Practical value.** The use of information systems in mining allows us to increase the efficiency and safety of operations by ensuring the transmission and recording of operational information in the process of control over the solving of current problems, and through fast response to the emergencies caused by geomechanical factors.

**Keywords:** *mining safety, information system, simulation, geomechanics*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук Л.Н. Ширінім. Дата надходження рукопису 17.01.15.*

УДК 504.53:631.43

**О.Н. Iziyova, Cand. Sci. (Biol.)**

Zhytomyr State Technological University, Zhytomyr, Ukraine, e-mail: oksanaas1@rambler.ru

## FORMATION OF WATER-PHYSICAL PROPERTIES OF SOIL IN RECULTIVATED AREAS

**О.Г. Ізюмова, канд. біол. наук**

Житомирський державний технологічний університет, м. Житомир, Україна, e-mail: oksanaas1@rambler.ru

## ФОРМУВАННЯ ВОДНО-ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ҐРУНТУ РЕКУЛЬТИВОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ

**Purpose.** To study the physical processes of formation of physical and water-physical properties of sod-podzolic soil in the areas reclaimed after mining developments for practical measures on full implementation of the ecosystem functions of soil under technogenesis conditions.

**Methodology.** The methodological basis of research was the concept of environmental monitoring. Conventional methods in ecology, field and laboratory ones, were used for the research. In the field studies, the methods of comparative analogy with regional control were used. The laboratory tests were conducted in accordance with generally accepted in soil science certified and standardized methods.

**Findings.** Under natural soil conditions, a 30-year period after the remediation is insufficient to restore the evolutionary balanced parameters of physical structure of the soil. The residual effects of its physical abuse appear to change the density compilation, porosity and, consequently, the quantitative characteristics of water-physical constants and forms of soil moisture reserves.

**Originality.** For the areas reclaimed after opencast mines, the time and quantitative parameters of forming the physical structure and water-physical constants of disturbed soil by natural soil conditions were first established. The possible scenarios for forming stocks of productive moisture in the plow layer of soil were shown.

**Practical value.** The regularities of forming agrophysical soil properties can be used by mining companies to justify the technical specifications of the restoration of land after opencast mines and by farms to develop measures aimed at regulating elements of disturbed soil fertility and improvement of technological schemes of growing crops on the reclaimed areas.

**Keywords:** *recultivated area, soil porosity, density compilation of soil, soil moisture, water and physical constants, soil moisture reserves*