

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ ПРОГНОЗА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНОГО МАССИВА

<sup>1</sup>Слащев А.И.

<sup>1</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

## ВДОСКОНАЛЕННЯ ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПОРОДНОГО МАСИВУ

<sup>1</sup>Слащов А.І.

<sup>1</sup>Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

## IMPROVEMENT OF THE DIGITAL SYSTEM FOR THE ROCK STRESS-STRAIN STATE FORECASTING

<sup>1</sup>Slashchov A.I.

<sup>1</sup>Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine

**Аннотация.** В статье приведены исследования по совершенствованию апробированной и хорошо зарекомендовавшей себя на практике информационной системы для расчета напряженно-деформированного состояния горных пород и оценки устойчивости выработок. Данная цифровая система используется как один из основных элементов для прогнозирования рисков потери устойчивости горных выработок и обеспечения безопасности ведения горных работ. Цель исследований: совершенствование методов организации вычислительных процессов и построения программных моделей для автоматизированной подготовки исходных данных и анализа результатов решения сложных задач устойчивости породного массива и горных выработок. Исследованиями установлено, что время расчета в программе снижается при увеличении центростремительного сцепления взаимосвязанных групп классов и увеличивается при возрастании их абстрактности. Это позволило получить наилучшую сбалансированность информационной системы за счет минимизации сумм отклонений метрик нестабильности и абстрактности Мартина по всем группам классов информационной системы. Новые решения послужили основой информационной системы для поддержки принятия решений по безопасности шахт. Разработана новая система ввода исходной информации, отображения и анализа результатов решения сложных задач геомеханической устойчивости. Цифровая система прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива имеет ряд преимуществ и отличается: интерактивным управлением расчетными схемами; возможностью автоматизированного разбиения исследуемой области; дифференцированным разделением диапазонов значений; редактором физико-механических свойств пород; функциями расчета базовых и интегральных параметров среды, а также возможностью сравнения состояний объекта управления. Реализованы алгоритмы расчета 16 типов автоматической дискретизации модели, заданных сил и перемещений, координат узлов, углов падения породных слоев. Данная цифровая система прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива используется для поддержки принятия решений путем оценки устойчивости породного массива и выработок.

**Ключевые слова:** безопасность горных работ, моделирование, геомеханика, оптимизация информационных систем, программная инженерия.

Современные программы по оценке геомеханического состояния породного массива представляют собой сложные объектно-ориентированные информационные системы, включающие алгоритмы обработки больших массивов данных. Вместе с тем, далеко не каждое программное обеспечение имеет возможность работать в информационных системах безопасности в режиме реального времени для оперативного прогноза состояния породного массива вследствие их недостаточной производительности и надежности. Эти

системы должны отвечать высоким требованиям по корректности исходных данных, иметь низкую погрешность вычислений, а также предоставлять инженеру все необходимые инструменты для полноценного управления процессом оценки напряженно-деформированного состояния массива пород (интерактивностью, возможностями ситуационного анализа и др.). Поэтому для повышения надежности принимаемых решений по обеспечению безопасности на шахтах актуальной является задача улучшения качества и надежности работы программных алгоритмов и повышения быстродействия информационных систем оперативного прогнозирования протекания геомеханических процессов.

Целью данных исследований было совершенствование методов организации вычислительных процессов и построения программных моделей для автоматизированной подготовки исходных данных и анализа результатов решения сложных задач устойчивости породного массива и горных выработок, как одного из основных элементов системы обеспечения безопасности ведения горных работ по геомеханическому фактору. Разработка данной подсистемы проведена на базе апробированной и хорошо зарекомендовавшей себя на практике информационной системы GEO-RS<sup>©</sup>, предназначенной для расчета напряженно-деформированного состояния горных пород и оценки устойчивости выработок [1-3].

Анализ версий расчетного комплекса показал, что данная система имеет ряд недостатков, которые не позволяют ее эффективно использовать в качестве элемента системы безопасности. В частности: отсутствует интерактивное взаимодействие пользователя с программой и визуализация интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния исследуемой геомеханической модели (комбинаций напряжений, критериев устойчивости, ориентации векторов главных напряжений); нет процедуры экспорта рассчитанных данных; процесс моделирования не автоматизирован; низкая скорость прорисовки графических объектов; невозможность отображения расчетных схем больше десяти тысяч элементов; нет связи с данными физико-механических свойств пород; нет управления отображением координат узлов, номеров элементов, свойств объектов.

В результате исследований создана архитектура подсистемы ввода исходной информации, отображения и анализа результатов расчета, которая лишена указанных недостатков и была интегрирована в новую версию программного комплекса. Архитектура подсистемы состоит из основных структурных элементов, которые связаны между собой посредством программных функций (рис. 1). В первую группу входят алгоритмы защиты от несанкционированного доступа (рис. 1, блок 1). Система защищена паролем при входе в программу и выходе из ждущего режима компьютера.

Вторая группа модулей (препроцессор) обеспечивают загрузку сохраненной или создание новой расчетной схемы в интерактивном режиме с формированием динамических массивов исходных данных для расчета

напряженно-деформированного состояния среды, рис. 1, блок 3. Модули препроцессора позволяют: на базе треугольных элементов формировать расчетные схемы породного массива с учетом его структуры и конфигурации выработок; вводить исходные прочностные и деформационные характеристики пород послойно и для каждого элемента в отдельности; выполнять загрузку, корректировку и предварительный просмотр подготовленных расчетных схем. В препроцессоре реализованы алгоритмы расчета шестнадцати типов автоматической дискретизации модели, заданных распределенных сил и перемещений, координат узлов, углов падения породных слоев.

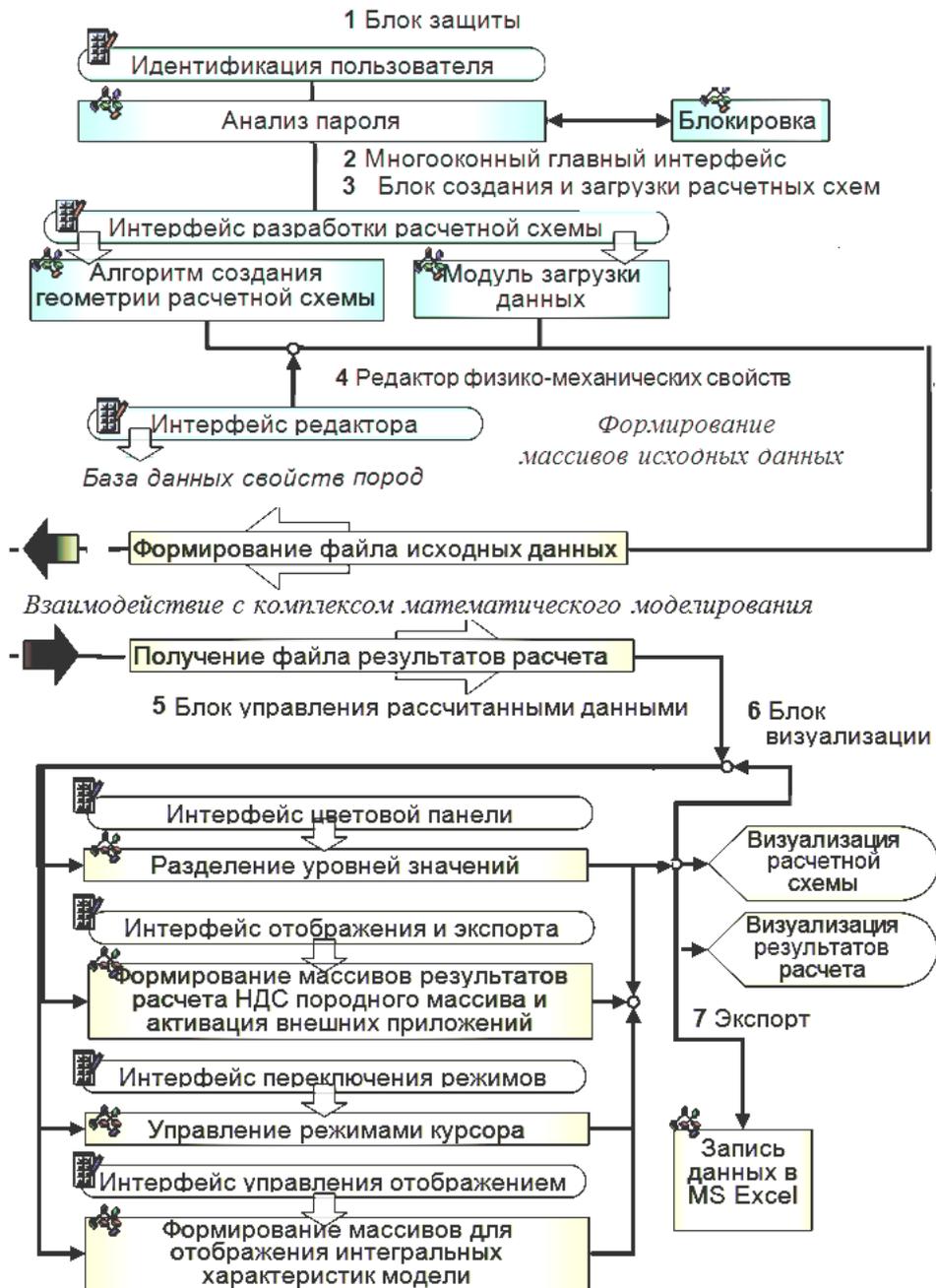


Рисунок 1 – Функциональная схема построения системы ввода исходной информации, отображения и анализа результатов расчета

В программе предусмотрена возможность корректировки исходных граничных условий, в том числе по результатам шахтного мониторинга: сил, смещений узлов, физико-механических свойств горных пород. Реализован режим интерактивной визуализации исходных и рассчитанных данных. Работа системы может быть настроена на аппаратном обеспечении вне зависимости от изготовителя оборудования. Диалоги являются самостоятельными объектами, позволяющими организовать расчет путем вызова расчетного модуля расчета методом конечных элементов и полностью управлять отображением расчетных схем и результатов расчета. Кроме процедур вычисления матриц программа содержит алгоритм вычисления их изменений в зависимости от положения угла зрения исследователя. Класс связан с конкретной расчетной схемой и содержит процедуры обработки событий для ее создания, перемещения, вращения и масштабирования (табл. 1.).

Таблица 1 – Разработанные модули для цифровой системы прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива

Функциональное назначение	Описание модулей реализации
Абстрактная модель	Интерфейс модели
	Абстрактный просмотрщик
	Абстрактная панель для настроек
Реализация модели	Главный класс, содержащий все данные
	Конструктор для создания равномерной разбивки
	Отображение и редактирование геомеханической схемы
	Настройка данных
	Создание расчетных схем
Главный фрейм	Главное окно программы
Панели	Модель реализации редактора
	Окно отображения фалов с предварительным просмотром
Диалоги	Создает диалоговые окна для работы с файлом
	Создает геомеханическую расчетную схему
	Открывает геомеханическую расчетную схему
	Сохраняет геомеханическую расчетную схему
Связи компонентов модели	Связь узлов и номеров физико-механических свойств
	Хранение координат, настроек сил и смещений
	Содержит данные о физико-механических свойствах
Редактирование физико-механических свойств	Матрица-вектор структур физико-механических свойств
	Модель представления физико-механических свойств в таблице
	Диалог для редактирования физико-механических свойств
Работа с потоками	Дополненный алгоритм ввода данных
	Дополненный алгоритм вывода данных
	Библиотека для быстрого сжатия данных
Модуль сопровождения расчета	Подготавливает файл исходных данных. Запускает расчет. Считывает файл результатов.
Экспорт данных	Экспортирует в MS Excel
	Экспортирует в текстовый файл

Создание геомеханических расчетных схем происходит в конструкторе. Создание массива координат узлов  $[node]_k$  (рис. 2, а) выполнено по формуле:

$$[node]_k = [x_k, y_k] \leftarrow \begin{cases} x_k = k \bmod (countX + 1) \\ y_k = k \operatorname{div} (countX + 1) \end{cases}, \quad (1)$$

где  $x_k, y_k$  – координаты по осям  $x$  и  $y$ ;  $countX$  – число столбцов;  $k$  – номер узла.

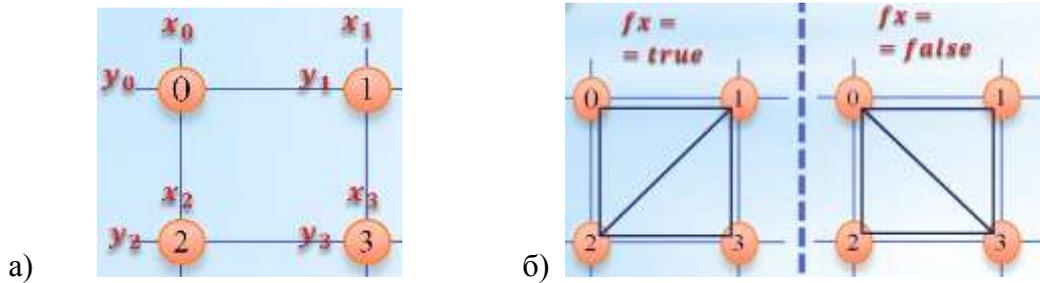


Рисунок 2 – Дискретизация геомеханических расчетных схем: а – схема формирования координат узлов; б – разбивка прямоугольных моноблоков на элементы треугольной формы

Направление разбивки прямоугольника на элементы треугольной формы поставлено в зависимость от флагов  $fx$  (рис. 2, б). В результате при построении расчетной схемы МКЭ, состоящей из групп блоков по восемь симплекс элементов треугольной формы, реализовано 16 типов дискретизации схем.

Оцифровка и подготовка данных по расположению элементов в расчетной схеме производится путем вычисления значений массива  $[uz_i]$ , содержащего номера окружающих каждый элемент узлов при выбранном способе разбиения модели на конечные треугольные элементы:

$$[uz]_i = [uz_1, uz_2, uz_3]_i = \begin{cases} \left. \begin{array}{l} fx == true \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{cases} uz_{(k \setminus 2)} = \begin{cases} uz_1 = nu + countX + 1; \\ uz_2 = nu + 1; \\ uz_3 = nu. \end{cases} \\ \\ \\ \end{cases} \\ \left. \begin{array}{l} fx == false \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{cases} uz_{(k \setminus 2)+1} = \begin{cases} uz_1 = nu + countX + 1; \\ uz_2 = nu + countX + 2; \\ uz_3 = nu + 1. \end{cases} \\ \\ \\ \end{cases} \end{cases}, \quad 2)$$

где  $uz_1, uz_2, uz_3$  – номера узлов, окружающих элемент;  $nu$  – номер верхнего левого узла прямоугольного моноблока;  $k$  – номер узла.

Создание вектора элементов реализовано в программных классах: FMS, FMSVector, FMSTableMode (отображение и редактирование физико-механических свойств пород); VersionDataInputStream, VersionDataOutputStream (ввод и вывод данных); EditorFrame (главное окно программы); ModelEditor (панели редактора); NewDialog, OpenFileDialog, SaveDialog (диалоговые окна). В препроцессоре реализованы алгоритмы расчета 16 типов автоматической дискретизации модели, заданных сил и перемещений, координат узлов, углов падения породных слоев. Интерфейс препроцессора показан на рис. 3.

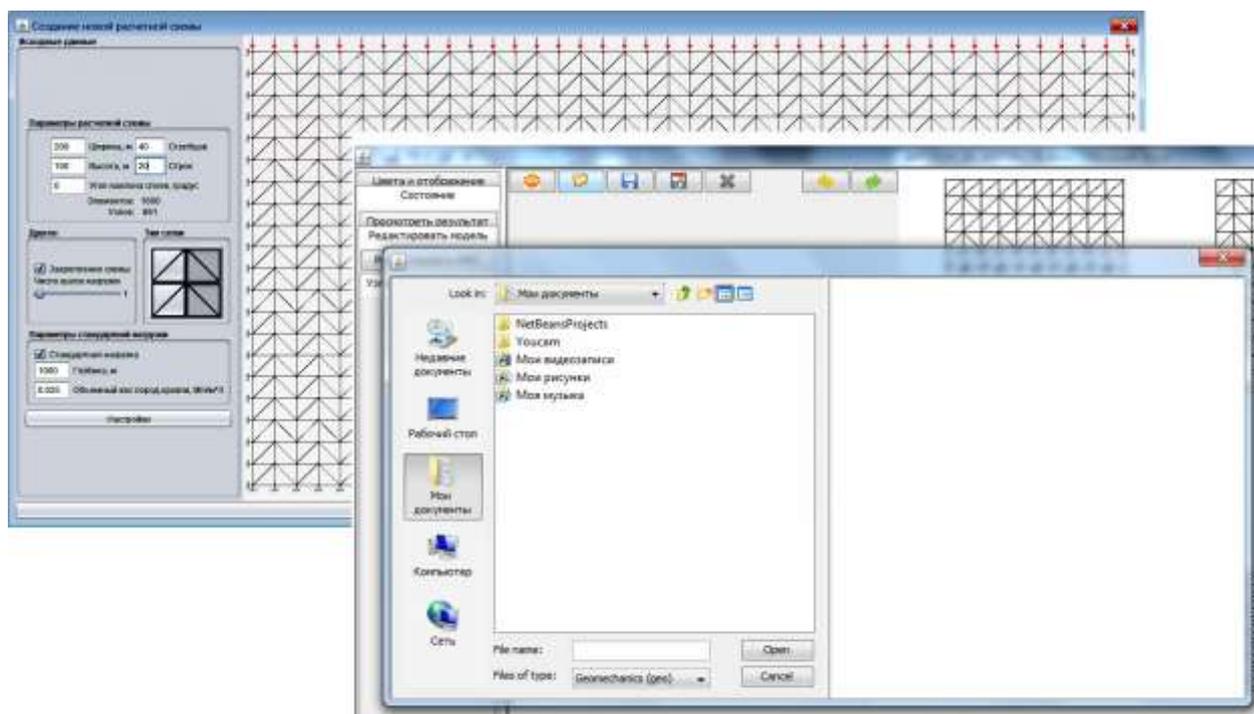


Рисунок 3 – Диалоговые окна для создания, автоматической дискретизации, открытия и сохранения расчетных схем

В связи с тем, что данные отделены от интерфейса, в программе реализован просмотр нескольких расчетных схем одновременно. Это позволяет пользователю обрабатывать больше информации, быстро выбрать для корректировки или расчета необходимую схему. Обмен данными между препроцессором и вычислителем метода конечных элементов (МКЭ) выбран файловый, то есть входными данными для программы являются два файла. Первый содержит данные, подготовленные препроцессором. Второй – это файл результатов расчета. Тип файлов – некомпьютеризированные текстовые.

Параметры конкретной горнотехнической ситуации учитываются заданием в модели граничных условий и физико-механических свойств пород [2-4]. Базы известной информации об объекте управления предназначены для оперативного анализа, корректировки и ввода в расчетный модуль исходных данных (рис. 1, блок 4).

При моделировании число описываемых структур исчисляется сотнями. По этой причине для подсистемы разработаны функции, отвечающие за

формирование исходной базы данных типов элементов. Данный модуль отслеживает изменения типов элементов модели и значения соответствующих параметров, производит запись введенных пользователем данных. Посредством графического интерфейса происходит выборка, отображение и фильтрация необходимых параметров свойств пород. События изменения объектов внутри интерфейса и перемещения данных в окно для расчетов инициируются пользователем путем «захвата» выделенного объекта в окне базы данных и перемещении его на панель заданных свойств пород модели.

В результате расчетов определяют узловые смещения и силы, значения осевых деформаций, главных и касательных напряжений для каждого элемента расчетной схемы [4-6]. В каждом конкретном случае для более детальной характеристики напряженно-деформированного состояния породного массива рассчитываются интегральные информативные параметры: полные смещения узлов, ориентация площадок скольжения, площади зон неупругого деформирования и разрыва сплошности, концентрации и интенсивность изменения во времени главных напряжений, ориентация главных напряжений и деформаций и др. [3, 4, 7-9]. Расчетный постпроцессор и служат для вычисления интегральных характеристик модели, а также графического анализа результатов расчета (рис. 1, блоки 5, 6). В постпроцессоре реализованы технологии обработки, анализа и визуализации больших массивов данных. При работе программы в режиме постпроцессора автоматически или по выбору инженера создается дифференцированная цветовая шкала, по которой определяют параметры поля напряжений и деформаций: сглаженное представление диапазона значений параметров; выделение необходимого диапазона значений одним цветом; выделение в одном диапазоне поддиапазонов; отсечение краевых эффектов модели (рис. 4).

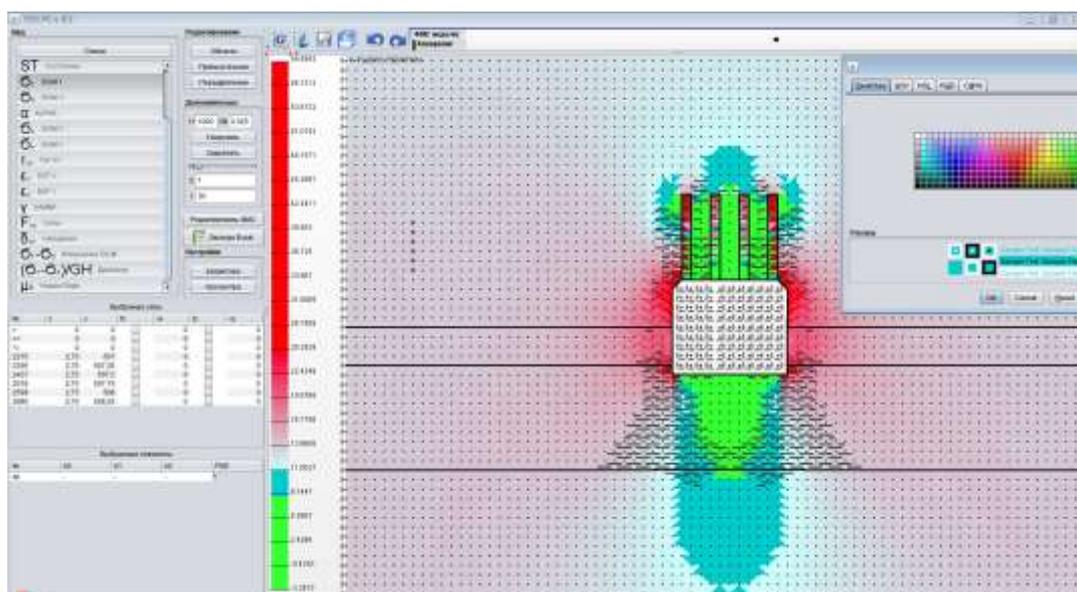


Рисунок 4 – Работа дифференцированной цветовой панели: а – разделение уровней значений на дискретные неравные интервалы; б – сглаживание результатов; в – комбинация вывода уровней напряжений и трещиноватых зон

Для возможности повторного использования исходного кода использован фабричный метод, заключающийся в создании шаблона проектирования, который представляет подклассом интерфейс для экземпляров некоторого класса. То есть, «Factory Method» делегирует создание объектов наследникам родительского класса. Это позволяет использовать в коде программы не специфические классы, а манипулировать абстрактными объектами на более высоком уровне, установить связь между параллельными иерархиями классов, сделать код создания объектов более универсальным, не привязываясь к конкретным классам, а оперируя лишь общим интерфейсом.

Чтобы модель взаимодействовала с интерфейсом пользователя реализовано четыре класса, описывающих поведение модели и ее функциональность. Схема взаимодействия модели с интегрированным интерфейсом показана на рис. 5. Классы, в названии которых есть слово «Factory», реализуют шаблоны проектирования, в частности, «GeomechanicsRect», «GeomechanicsView» и др.

Главный интерфейс позволяет открывать, сохранять и редактировать различные модели (аналог простой интегрированной среды). Документирование результатов в виде таблиц *MS Excel*, для вывода на печать, передачи в *MathCad* и другие приложения выполняется модулями седьмой группы (рис. 1, блок 7).

Предложенные решения позволяют в полной мере и с максимальной эффективностью использовать разработанные численные алгоритмы в системе обеспечения безопасности ведения горных работ по геомеханическому фактору. При этом они обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с аналогами, в частности, в подсистеме реализованы функции вычисления ориентации площадок сдвига в зависимости от положения структурных дефектов в породах, различные методологии анализа результатов и др.

Работа программного обеспечения в «режиме реального времени» должна иметь достаточную производительность и надежность. Для оценки вычислительной эффективности программного продукта необходимо использовать методологию подсчета различных метрик, которые определяют качество программы, что важно при создании систем, обеспечивающих безопасность элементов производственного процесса. Так, при сертификации на более высокие уровни по стандартам информационной безопасности ISO/IEC (информационные технологии-технологии безопасности-практические правила менеджмента информационной безопасности, Information technology-Security techniques-Code of practice for information security management) или набору моделей (методологий) совершенствования процессов в организациях США разных размеров и видов деятельности CMMI (Capability Maturity Model Integration [10]) использование метрик кода является обязательным, что позволяет в определенной степени достичь надежности и эффективности программного обеспечения. Оценку эффективности проектов, разработанных на базе объектно-ориентированных языков программирования, осуществляют с помощью объектно-ориентированных метрик (табл. 2).

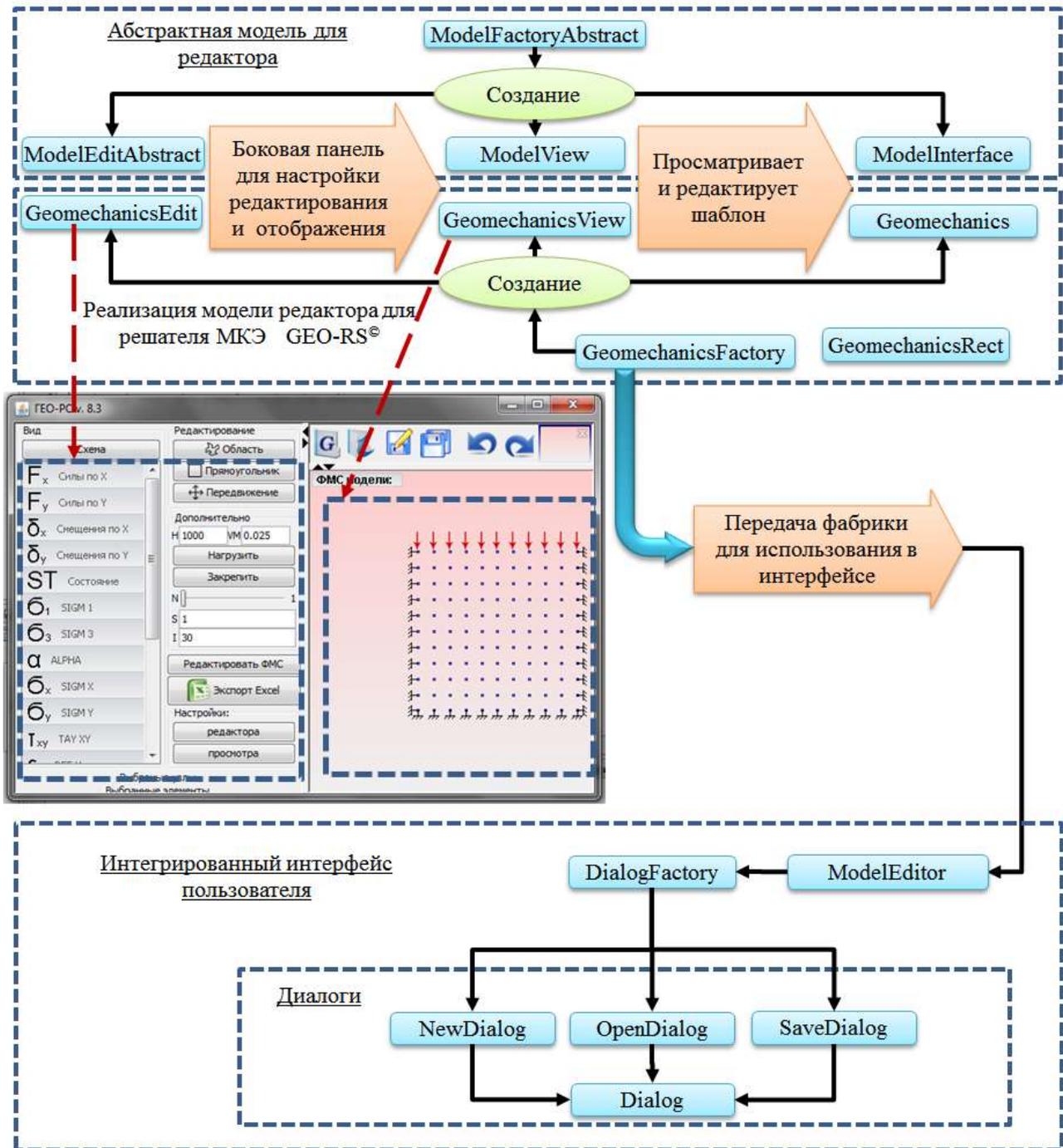


Рисунок 5 – Абстрактная модель и взаимодействие модели с интерфейсом в информационной системе для прогноза напряженно-деформированного состояния породного массива

Метрика связности объектов определяется сцеплением (coupling) или «зависимостью» групп классов – это мера того, насколько класс сфокусирован на своих задачах и зависит от других классов:

$$C_e = r_t \left( \sum_{i=1}^n r_i \right), \quad (3)$$

Таблица 2 – Объектно-ориентированные метрики программного кода

Метрика	Описание
Глубина дерева наследования (Depth of inheritance tree)	Длина самого длинного пути наследования, заканчивающегося на данном модуле. Чем глубже дерево наследования модуля, тем может оказаться сложнее предсказать его поведение. С другой стороны, увеличение глубины дает больший потенциал повторного использования данным модулем поведения, определенного для классов-предков.
Количество наследований (Number of children)	Число модулей, непосредственно наследующих данный модуль. Большие значения этой метрики указывают на широкие возможности повторного использования; при этом слишком большое значение может свидетельствовать о плохо выбранной абстракции.
Связность объектов (Coupling between objects)	Количество модулей, связанных с данным модулем в роли клиента или поставщика. Чрезмерная связность говорит о слабости модульной инкапсуляции и может препятствовать повторному использованию кода.
Отклик на класс (Response For Class)	Количество методов, которые могут вызываться экземплярами класса; вычисляется как сумма количества локальных методов, так и количества удаленных методов

где  $r_i$  – количество ссылок на класс, где ссылка – это поле, локальная переменная, возвращаемый тип или параметр метода;  $r_i$  – количество ссылок на класс, участвующий в подсчете метрики;  $n$  – количество классов.

Важным параметром является «нестабильность» (instability), определяющим степень зависимости классов друг от друга в пределах модуля:

$$I = \frac{C_e}{C_a + C_e}, \quad (4)$$

где  $I$  – нестабильность, о.е.;  $C_e$  – центростремительное сцепление, определяет количество классов вне исследуемой категории, зависящее от классов внутри этой категории, шт;  $C_a$  – центробежное сцепление, определяет количество классов внутри категории, зависящее от классов вне этой категории, шт.

Кроме того, нам необходимо определять метрику, которая измеряет «абстрактность» категории классов, так как, исследуя абстрактность, мы можем определить возможности дальнейшего расширения приложения. Если категория абстрактна, то она достаточно гибкая и может быть легко расширена. Абстрактность определяется из выражения [11, 12]:

$$A = nA/nAll, \quad (5)$$

где  $A$  – абстрактность, о.е.;  $nA$  – количество абстрактных классов в категории, шт.;  $nAll$  – общее количество классов в категории, шт.

Значения этой метрики изменяются в диапазоне 0...1. При этом, если  $A=0$ , то категория конкретна, а если  $A=1$ , то категория полностью абстрактна.

Для контроля качества, надежности и производительности работы информационной системы разработана программа, которая позволяет

автоматизировать процесс анализа исходного кода приложений и производить расчет метрик связности, сцепления и нестабильности групп классов проекта по методике подсчета параметров эффективности (рис. 6). Для контроля качества, надежности и производительности работы информационной системы разработана программа, которая позволяет автоматизировать процесс анализа исходного кода приложений и производить расчет метрик связности, сцепления и нестабильности групп классов проекта по методике подсчета параметров эффективности.

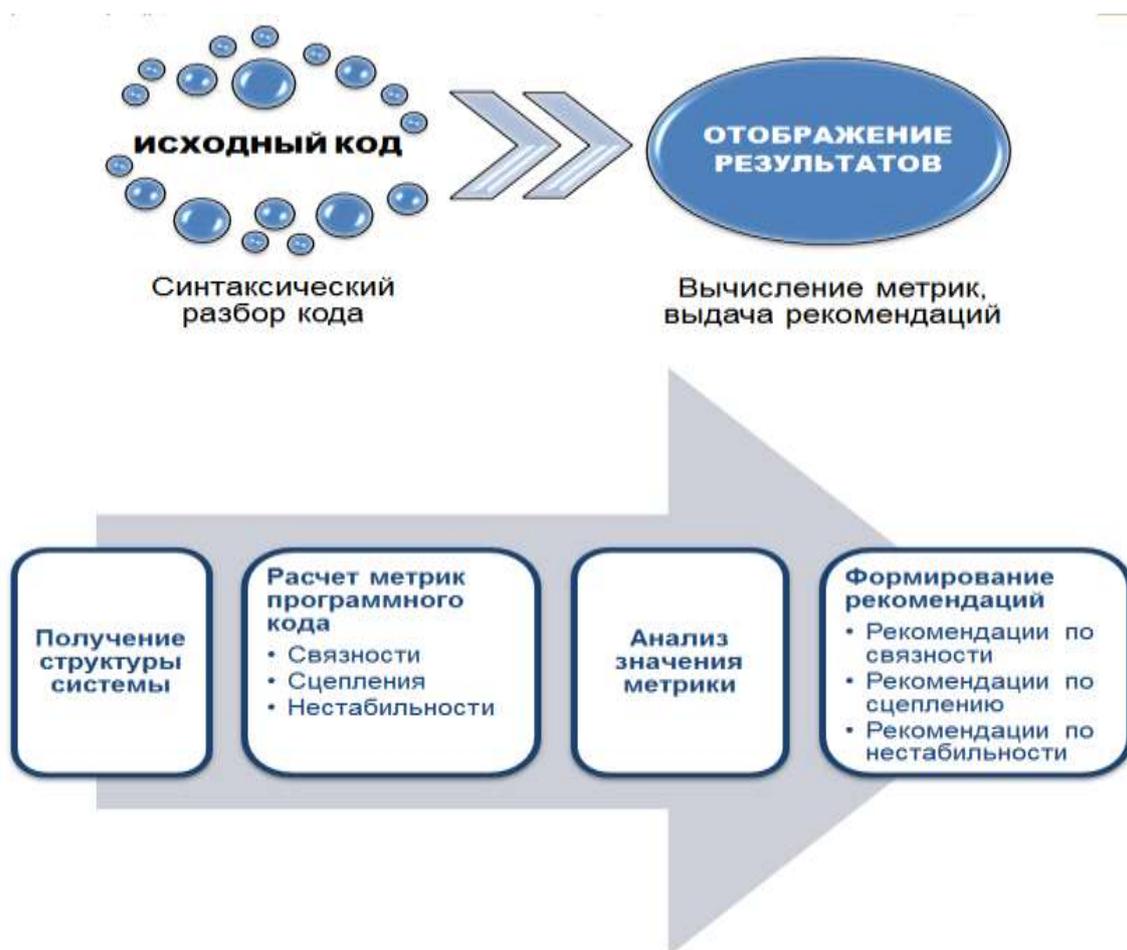


Рисунок 6 – Схема методики подсчета эффективности параметров системы

Для анализа программного кода информационной системы GEO-RS<sup>©</sup> исследованы метрики качества исходного кода Мартина, а именно связность, сцепление и нестабильность; разработан алгоритм подсчета значений метрик; разработана экспертная система по выдаче текстовых рекомендаций на основе полученных метрик; выработаны рекомендации для метрик связности, сцепления и нестабильности; реализован прототип приложения для анализа исходного кода с использованием метрик. Для подсчета метрик подсчитывались связи, которые взаимодействуют с каждой категорией. Принцип единственной ответственности (single responsibility principle) предполагает, что в лучшем случае класс должен иметь лишь одну возможную причину для изменений [13].

Исследования показали, что нестабильность и абстрактность всей информационной системы составила  $I=0,899$  и  $A=0,203$ , соответственно. Полученный уровень нестабильности обусловлен тем, что система использует интерфейс, поддерживающий много связей. Для совершенствования информационной системы созданы два промежуточных класса *Panel* и *Dialog* в результате чего нестабильность проекта была снижена до  $I=0,857$ .

Разработан и реализован менеджер ресурсов, который содержит функцию быстрой загрузки ресурса. Преимущество такого подхода в том, что если основной поток не имеет возможности продолжать работу без определенного ресурса, то менеджер направляет загрузку ресурса на основной поток (чтобы функция вернула ненулевой указатель) и, при необходимости, приостанавливает выполнение других потоков (например, чтобы быстрее произошла загрузка с винчестера, другие потоки не будут обращаться к нему).

В менеджере ресурсов применен статистический метод поиска малоиспользуемой информации, когда рейтинг ресурсу информационной системы (определяется переменной  $fRating$ ) назначается на основе частоты его использования. Чем больше значение переменной  $fRating$ , тем ресурс более важен и больше используется. При каждом использовании объекта переменная  $fRating$  наращивается на величину  $fRatingAdd$ . Например, чем дольше загружается объект, тем он важнее. Если изображение загружается с удаленного сервера, то его нужно хранить дольше чем при загрузке того же изображения с винчестера, и, чтобы этому ресурсу прибавить важность, следует умножить  $fRatingAdd$  на коэффициент, который показывает во сколько раз дольше идет загрузка с сервера, чем с винчестера. Или можно сохранить изображение на винчестер и назначить ему обычный приоритет. Если объект занимает мало физической памяти, то ему нужно увеличить значение  $fRatingAdd$ . Большие объекты легче перегружать в оперативную память, если они не используются много раз. Если объект очень нестабилен, это говорит о наличии множества ссылок на него извне, то есть на него могут ссылаться другие объекты. Поэтому, чем больше нестабильность объекта тем он более важен. Для информационной системы предложена формула для вычисления управляющей переменной:

$$fRatingAdd = k_v \left( 2 - \frac{v - v_{min}}{v_{max} - v_{min}} \right) + k_V \left( 2 - \frac{V - V_{min}}{V_{max} - V_{min}} \right) + k_I \left( 2 - \frac{I - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \right), \quad (6)$$

где  $v, v_{min}, v_{max}$  – текущая, минимальная и максимальная скорости загрузки ресурсов;  $V, V_{min}, V_{max}$  – текущий, минимальный и максимальный размеры ресурсов программы;  $I, I_{min}, I_{max}$  – текущая, минимальная и максимальная нестабильность программных классов, имеющих отношение к ресурсам;  $k_v, k_V, k_I$  – управляющие коэффициенты от нуля до единицы, характеризующие относительные приоритеты и влияние относительно других рейтингов скорости загрузки ресурса, размеров ресурсов и нестабильности категории классов, соответственно.

Управляющие коэффициенты находятся в диапазоне  $[0; 1]$  и в сумме равны единице, то есть ограничения и допущения этой зависимости можно представить в виде:

$$k_D[0; 1] + k_V[0; 1] + k_I[0; 1] = 1 ; \quad fRatingAdd = [3; 6]. \quad (7)$$

На рисунке 7 показан график, на котором отражена зависимость между абстрактностью и нестабильностью каждой категории классов информационной системы и прямая  $I+A=1$ , которая называется главной последовательностью. На этой прямой лежат параметры программных классов, имеющие наилучшую сбалансированность между абстрактностью и нестабильностью групп классов проекта. Поэтому информационная система, у которой все группы классов лежат на главной последовательности может считаться оптимально сбалансированной.

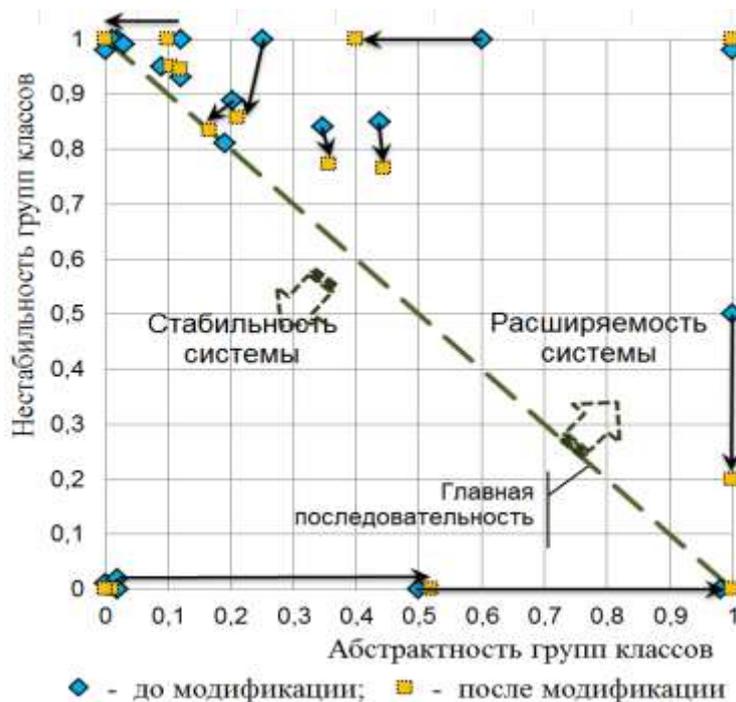


Рисунок 7 – Абстрактность и нестабильность взаимосвязанных групп классов до и после модификации исходного программного кода

Конечно, реальный проект такими свойствами не обладает. Вместе с тем, мы можем путем перестройки структуры информационной системы добиться максимального приближения групп классов к главной последовательности. Для этого введем еще два информативных параметра, которые будут отражать:

- расстояние до главной последовательности

$$D = \left| \frac{A + I - 1}{\sqrt{2}} \right| \rightarrow \min, \text{ o.e.}; \quad (8)$$

- нормализованное расстояние до главной последовательности

$$Dn = |A + I - 2|. \quad (9)$$

Установлено, что время расчета в программах по оценке геомеханического состояния породного массива, использующих большие массивы данных снижается при увеличении центростремительного сцепления взаимосвязанных групп классов и увеличивается при возрастании их абстрактности, что позволяет за счет минимизации сумм отклонений метрик нестабильности и абстрактности Мартина по всем группам классов проекта получить наилучшую сбалансированность информационной системы. Анализ изменения расстояний до главной последовательности после модификации групп классов проекта (рис. 7) показал, что выполненные изменения исходного кода снизили отклонение параметров абстрактности и нестабильности от главной последовательности в среднем на 28 %. В результате была обеспечена эффективность работы информационной системы в «режиме реального времени».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иконников М.Ю. и др. Математическое моделирование в задачах оценки эффективности и безопасности горных работ. Днепропетровск: НГУ, 2015. 215 с.
2. Булат А.Ф., Слащев И.Н., Яланский Алекс.А., Слащев А.И. Обоснование методов и алгоритмов оценки геомеханической безопасности ведения горных работ // Геотехническая механика. Днепр: ИГТМ НАНУ, 2017. № 135. С. 16-31.
3. Слащев И.Н., Слащева Е.А. Исследование процесса формирования зон разрушения в породном массиве при отработке смежных выемочных участков шахт // Геотехническая механика. Днепр: ИГТМ НАНУ, 2016. № 128. С. 179-191.
4. Булат А.Ф., Слащев И.Н., Слащева Е.А. Комплексирование методов оценки геомеханических и газодинамических процессов в породном массиве для систем контроля производственной среды шахт // Геотехническая механика. Днепр : ИГТМ НАНУ, 2017. № 134. С. 3-21.
5. Булат А.Ф., Слащев И.Н. Использование продуктов распада радона как информативных параметров для оценки геомеханического состояния горных пород // Геотехническая механика. Днепр: ИГТМ НАНУ, 2017. № 132. С. 3-16.
6. Слащев А.И. Обоснование параметров информационной системы обеспечения безопасности подземных горных работ // Науковий вісник НГУ. 2016. № 1. С. 77–85.
7. Булат А.Ф., Слащев И.Н., Иконникова Н.А. Принципы построения систем удаленного контроля безопасности шахт // Геотехническая механика. Днепр : ИГТМ НАНУ, 2017. № 137. С. 3-17.
8. Шевченко В.Г., Слащев А.И. Информационные системы безопасности и производительности подземных горных работ. Київ: Наукова думка, 2018. 285 с.
9. Яланский А.А., Слащев А.И., Селезнев А.М. Исследование способов борьбы с пучением почвы в горных выработках методом конечных элементов // Геотехническая механика. Днепр: ИГТМ НАНУ, 2017. № 133. С. 239-249.
10. CMMI Guidebook Acquirer Team (2007) Understanding and Leveraging a Supplier's CMMI Efforts: A Guidebook for Acquirers. CMU/SEI-2007-TR-004. Software Engineering Institute. Retrieved 23 August 2007.
11. Robert C. Martin. Clean Code: A Handbook of Agile Software Craftsmanship. New York: Prentice-Hall, 2008. 125 p. ISBN 013235088.
12. Богданов Д.В., Фильчаков В.В. Стандартизация жизненного цикла и качества программных средств: Учебное пособие. СПб.: ГУАП, 2000. 210 с.
13. Beck, F. and Diehl, S. On the Congruence of Modularity and Code Coupling. Proceedings of the 19th ACM SIGSOFT Symposium and the 13th European Conference on Foundations of Software Engineering (SIGSOFT/FSE 11). Szeged, 2011. pp. 125-130.

#### REFERENCES

1. Ikonnikov M.YU., Ikonnikov YU.R., Slashcheva Ye.A., Slashchov I.N. and Yalanskiy, A.A. (2015), *Matematicheskoye modelirovaniye v zadachakh otsenki effektivnosti i bezopasnosti gornyykh rabot* [Mathematical modeling in solving problems of evaluating the efficacy and safety of mining operations], Natsionalnyy gornyy universitet and IGTM NAS of Ukraine, Dnipropetrovsk, UA.
2. Bulat A.F., Slashchov I.N., Yalanskiy Aleks.A. and Slashchov A.I. (2017), "Validation of methods and algorithms for estimating geomechanical safety of mining operations", *Geotekh. meh.*, no. 135, pp. 16-31.
3. Slashchov I.N. and Slashchova O.A. (2016), "Study of caving zone formation in the rock massif at mining adjacent panels in the mines", *Geotekh. meh.*, no. 128, pp. 179-191.
4. Bulat A.F., Slashchov I.N. and Slashchova O.A. (2017), "Evaluation methods of interconnected geomechanical and gas dynamic processes in the rock massif for the systems of working medium control in the mines", *Geotekh. meh.*, no. 134, pp. 3-21.

5. Bulat A.F. and Slashchov I.N. (2017), The use of radon decay products as informative parameters for evaluation of the rocks geomechanical condition, *Geotekh. meh.*, no. 132, pp. 3-16.
6. Slashchov A.I. (2016), "Justification of the parameters of the information system assuring the underground mining safety", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 1, pp. 77-85.
7. Bulat A.F., Slashchov I.N. and Ikonnikova N.A. (2017), "Principles for the development of remote control systems of the mine safety", *Geotekh. meh.*, no. 137, pp. 3-17.
8. Shevchenko V.G. and Slashchov A.I. (2018), *Informatsionnye sistemy bezopasnosti i proizvoditelnosti podzemnykh gornykh robot* [Information systems for underground mining safety and productivity], Naukova Dumka, Kyiv, UA.
9. Yalansky A.A., Slashchov A.I. and Seleznev A.M. (2017), "Study of methods for controlling the floor swelling in the mine workings with the help of finite-element methods", *Geotekh. meh.*, no. 133, pp. 239-249.
10. CMMI Guidebook Acquirer Team (2007), *Understanding and Leveraging a Supplier's CMMI Efforts: A Guidebook for Acquirers*. CMU/SEI-2007-TR-004. Software Engineering Institute. Retrieved 23 August 2007.
11. Robert C. Martin. (2008), *Clean Code: A Handbook of Agile Software Craftsmanship*, Prentice-Hall, New York, US.
12. Bogdanov D.V. and Filchakov V.V. (2000), *Standartizatsiya zhivnennogo tsikla i kachestva programnykh sredstv: uchebnoye posobiye* [Standardization of life cycle and quality of programmatic facilities: Train aid], GUAL, SPb, RU.
13. Beck, F. and Diehl, S. (2011), "On the Congruence of Modularity and Code Coupling", *Proceedings of the 19th ACM SIGSOFT Symposium and the 13th European Conference on Foundations of Software Engineering (SIGSOFT/FSE 11)*. Szeged, HU, pp. 125-130.

---

### Об авторе

**Слащев Антон Игоревич**, кандидат технических наук, младший научный сотрудник, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, [AlSlashchov@nas.gov.ua](mailto:AlSlashchov@nas.gov.ua)

### About the author

**Slashchov Anton Ihorovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Junior Researcher, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov NAS of Ukraine (IGTM, NAS of Ukraine), Dnipro, Ukraine, [AlSlashchov@nas.gov.ua](mailto:AlSlashchov@nas.gov.ua)

**Анотація.** У статті наведено дослідження щодо вдосконалення інформаційної системи для розрахунку напружено-деформованого стану гірських порід і оцінки стійкості виробок, яка апробована і добре зарекомендувала себе на практиці. Ця цифрова система використовується як один з основних елементів для прогнозування ризиків втрати стійкості гірничих виробок і забезпечення безпеки ведення гірничих робіт. Мета досліджень: вдосконалення методів організації обчислювальних процесів і побудови програмних моделей для автоматизованої підготовки вихідних даних та аналізу результатів вирішення складних задач з визначення стійкості породного масиву і гірничих виробок. Дослідженнями встановлено, що час розрахунку в програмі знижується при збільшенні центростремительного зчеплення взаємопов'язаних груп класів і збільшується при зростанні їх абстрактності. Це дозволило отримати найкращу збалансованість інформаційної системи за рахунок мінімізації сум відхилень метрик нестабільності і абстрактності Мартіна по всіх групах класів інформаційної системи. Нові рішення послужили основою інформаційної системи для підтримки прийняття рішень з безпеки шахт. Розроблено нову систему введення вихідної інформації, відображення та аналізу результатів вирішення складних задач геомеханічної стійкості. Цифрова система прогнозу напружено-деформованого стану породного масиву має ряд переваг і відрізняється: інтерактивним управлінням розрахунковими схемами; можливістю автоматизованого розбиття досліджуваної області; диференційованим поділом діапазонів значень; редактором фізико-механічних властивостей порід; функціями розрахунку базових і інтегральних параметрів середовища, а також можливістю порівняння станів об'єкта управління. Реалізовано алгоритми розрахунку 16 типів автоматичної дискретизації моделі, заданих сил і переміщень, координат вузлів, кутів падіння породних шарів. Ця цифрова система прогнозу напружено-деформованого стану породного масиву використовується для підтримки прийняття рішень шляхом оцінки стійкості породного масиву і виробок.

**Ключові слова:** безпека гірничих робіт, моделювання, геомеханіка, оптимізація інформаційних систем, програмна інженерія.

**Abstract.** In the article, the author presents his findings on improving the tested and well-proven in practice information system used for calculating stress-strain state of rocks and assessing stability of workings. This digital system is used as one of the main elements for forecasting risks and ensuring safety of the mining operations. Purpose of the research: to improve methods for organizing computational processes and to build software models of the initial data automated preparation and analysis of the results of solving the complex problems on the rock massif and mine working stability. The research showed that in this program, calculation time became shorter with increase of centripetal chaining of interconnected groups of classes and became longer with increase of their abstractness. This effect allowed

obtaining a well-balanced software package through the minimization of total deviations of the Martin metrics instability and abstractness for all groups of the information system classes. These new solutions laid the basis for the information system developed for supporting making of the decisions on the mine safety. A new system was developed for inputting initial information and for displaying and analyzing results of solving the complex problems of geomechanical stability. The designed digital system for the rock massif stress-strain state forecasting features some advantages and is distinguished by the following functions: interactive control of the design schemes; ability to automatically split domains under the study; differentiated separation of value ranges; editor of physical and mechanical properties of rocks; functions for calculation of basic and integral parameters for the medium, as well as ability to compare of the control object states. Besides, algorithms for calculating 16 types of automatic model discretization, given forces and displacements, node coordinates, angles of bed dip were built and implemented. This digital system for the rock massif stress-strain state forecasting is used for supporting making of decisions by assessing stability of the rock massif and mine workings.

**Keywords:** mine safety, simulation, geomechanics, optimization of information systems, software engineering.

*Стаття надійшла до редакції 12.08. 2018*

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук В.Г. Шевченком*