

Приведенная выше математическая модель продольно-поперечных колебаний конвейерной ленты, позволяющая определить их характеристики в условиях изменяющегося грузопотока, вероятностные характеристики самого грузопотока, являющегося возмущающим воздействием, критерии эффективности управления и ограничения параметров рассматриваемой системы представляют собой идентификацию процесса продольно-поперечных колебаний конвейерной ленты как объекта управления.

Идентификация управляемых объектов дает возможность определить закон и построить алгоритм управления ими, что является важнейшим при разработке системы автоматического управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кондрахин П.М. Поперечные колебания тяговонесущего органа конвейера / П.М. Кондрахин // Шахтный и карьерный транспорт. - М.: Недра, 1974. - Вып. 1. - С. 147-154.
2. Цыпкин Я.З. Адаптация и обучение в автоматических системах / Я.З. Цыпкин. - М.: Наука, 1968. - 400 с.
3. Жигула Т.И. Оптимальное управление приводом ленточного конвейера при различных режимах его работы / Т.И. Жигула, Л.П. Ладутина, В.Ю. Максютенко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАНУ. - Днепропетровск, 2005 – Вып. 55. - С. 29-35.

УДК 622.831:622.261

И.Н. Слащев, канд. техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)

ОЦЕНКА ТЕХНОГЕННОЙ ТРЕЩИНОВАТОСТИ МЕТОДАМИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Досліджені питання вдосконалення методів прогнозування зональності і просторової орієнтації техногенних тріщин, які були успішно апробовані у вугільних шахтах

ASSESSMENT TECHNOGENIC FRACTURING METHODS OF MATHEMATICAL SIMULATION

Questions are investigated to improve forecasting methods of zonality and spatial orientation of technogenic fracturing, which have been successfully tested at coal mines

Опыт эксплуатации подготовительных выработок за последние десять лет показал, что 30 % из них ежегодно перекрепляются. Это вызвано, прежде всего, увеличением глубины разработки и повышением интенсивности проявлений горного давления. Одним из путей решения проблемы обеспечения устойчивости и работоспособности подготовительных выработок является разработка новых способов и средств их поддержания, которые максимально используют грузонесущую способность породного массива, определенную на основе расчетных или экспериментальных методов. Вместе с тем, несмотря на большое количество работ, посвященных расчетным методам моделирования процессов разрушения, нет ясности в выборе адекватной условиям деформирования структурно-неоднородных пород математической модели, методов ее реализации и способов адаптации к реальным условиям. Методы анализа геомеханических процессов таких сложных систем требуют дальнейшего совершенствования

ния, поскольку отсутствуют надежные геомеханические модели, учитывающие специфику деформирования трещиноватых структурно-неоднородных пород, современные специализированные программы вычислений, автоматизированные системы анализа информации. Несмотря на достижения в области моделирования породного массива, вопросы определения зональности и интенсивности трещиноватости, границ зон дезинтеграции слоистых пород, прогноза пространственной ориентации и расположения техногенных трещин остаются весьма неопределенными. Поэтому целью данной работы было совершенствование методов прогнозирования зональности и пространственной ориентации техногенных трещин с учетом природных структурных дефектов.

Эксплуатация конкретного месторождения приводит к свойственному только данным условиям перераспределению полей напряжений и деформаций, которые под влиянием горных работ постоянно изменяются в пространстве и во времени. Чисто теоретические методы решения таких задач приводят к математически некорректным результатам, поскольку рост деформации при разупрочнении сопровождается уменьшением напряжения по абсолютной величине, а задание коэффициентов структурного ослабления в теоретических расчетах весьма проблематично. В таких условиях количественный анализ напряжений и деформаций можно корректно проводить с помощью ситуационных имитационных геомеханических моделей, основанных на механике сплошных сред и теории предельных состояний.

Рассмотрим структурную схему разработанной технологии компьютерного анализа упругого, упругопластического и запредельного деформирования структурно-неоднородного породного массива (рис. 1) для вычислительного комплекса имитационного моделирования. Задача решается путем выполнения в определенной последовательности совокупности операций, а процедура ее решения состоит в программной реализации этих операций. В основу алгоритма положен математический аппарат апробированных методов решения базовой линейной задачи теории упругости методом конечных элементов (МКЭ) [1], предельных и запредельных состояний пород методом начальных напряжений [2]. При этом он существенно отличается от известных алгоритмов, в частности алгоритма, предложенного в работе [3], который написан для линейного программирования (язык Fortran-4). Алгоритм разработан для объектно-ориентированной технологии программирования (языки C++, Visual basic), которая заключается в управлении объединенными типами данных (объектами и классами), каждый из которых имеет свою память, отличную от других объектов, и включает в себя объекты более низкого уровня с внутренним типом данных. В данном случае глобальный модуль программы является связкой программных объектов низкого уровня, которые работают на сообщениях и выполняют определенные вычислительные операции. Специализированные компьютерные программы включают базу данных физико-механических свойств горных пород для различных горно-геологических условий, что позволяет значительно ускорить решение широкого спектра геомеханических задач. Программное обеспечение рассчитано на выполнение автоматизированного ввода в

файл исходной информации, конвертирования исходных баз данных в массивы для непосредственного расчета напряженно-деформированного состояния, расчетов смещений узлов и других параметров поля напряжений, экспорт числовых значений в системы MS Excel и MathCAD. Разработаны объектно-ориентированная структура программного комплекса (структурный алгоритм), модель функционирования всей программной системы и последовательность выполнения отдельных вычислительных операций, исходный программный код расчета, анализа и визуализации систем трещиноватости. Программирование вычислительного комплекса выполнено группой разработчиков при участии автора.

Для оценки напряженно-деформированного состояния большой практический смысл имеют экспериментально-аналитические методы расчета, которые предусматривают текущую корректировку исходных граничных условий, в том числе по результатам шахтного мониторинга [4]. Поэтому в программном комплексе предусмотрена возможность такой корректировки: силовых факторов, смещений узлов, физико-механических свойств горных пород. Программно реализован режим интерактивной визуализации исходных и рассчитанных данных функциями прямого доступа мультимедийной библиотеки DirectX 8 SDK. Для оптимизации скорости вычислений матрицы жесткости системы прикладной поток данных и драйверы устройств переключены в режим ядра процессора путем прямого доступа указателями (Pointer) к адресам оперативной памяти, а также функциям и классам языка программирования C++. Графический программный модуль использует компонент библиотеки DirectX Graphics, который построен на основе модели основных компонентов COM (Component Object Model) и включает уровень абстракции оборудования HAL (Hardware Abstraction Layer), позволяющий настроить работу системы на любом аппаратном обеспечении вне зависимости от изготовителя оборудования.

Трещиноватость является важнейшим свойством горных пород, которое определяет его структуру и пространственную неоднородность, влияет на его прочность и устойчивость. Природная (первичная) трещиноватость трактуется как сочетание разрывов сплошной среды, перемещения по которым отсутствуют или очень незначительны, а их величина на порядок и больше превосходит межатомные расстояния в кристаллической решетке [5]. Техногенная трещиноватость возникает только при сооружении и эксплуатации подземных горных выработок и характеризуется подвижками (часто динамическими) по контактам магистральных трещин (master cracks), их раскрытостью и изменением ориентировки в пространстве. Прогнозирование техногенной трещиноватости, даже приближенное, представляет значительный научный и практический интерес, так как, в отличие от первичной трещиноватости, развитие техногенных трещин зависит не только от случайных природных горно-геологических факторов, но и от управляемых горнотехнических параметров горных работ. К ним, в первую очередь, относятся конструктивные и силовые параметры крепления

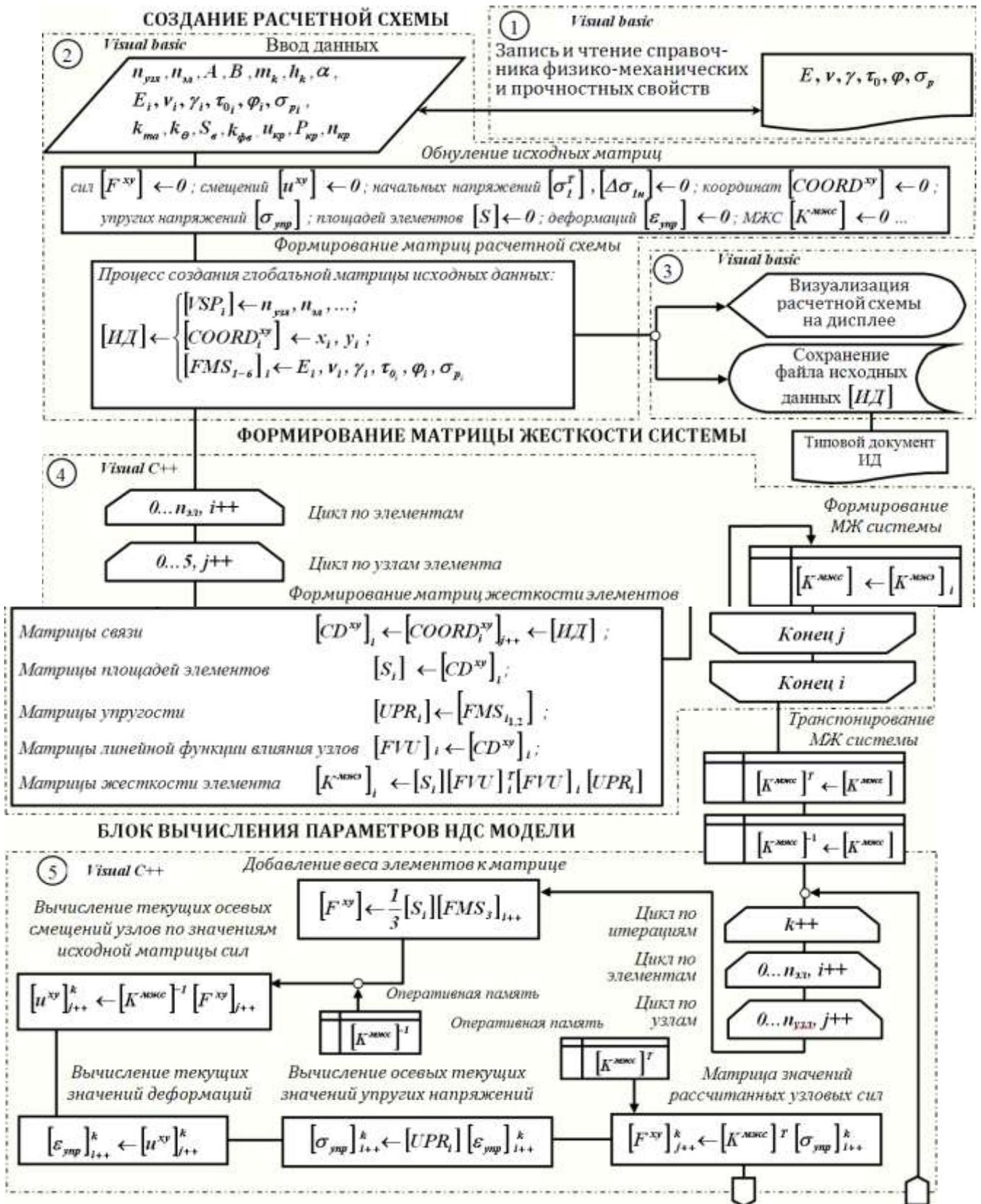


Рис. 1. Лист 1. – Структурная схема технологии компьютерного анализа упругого, упругопластического и запредельного деформирования структурно-неоднородного породного массива

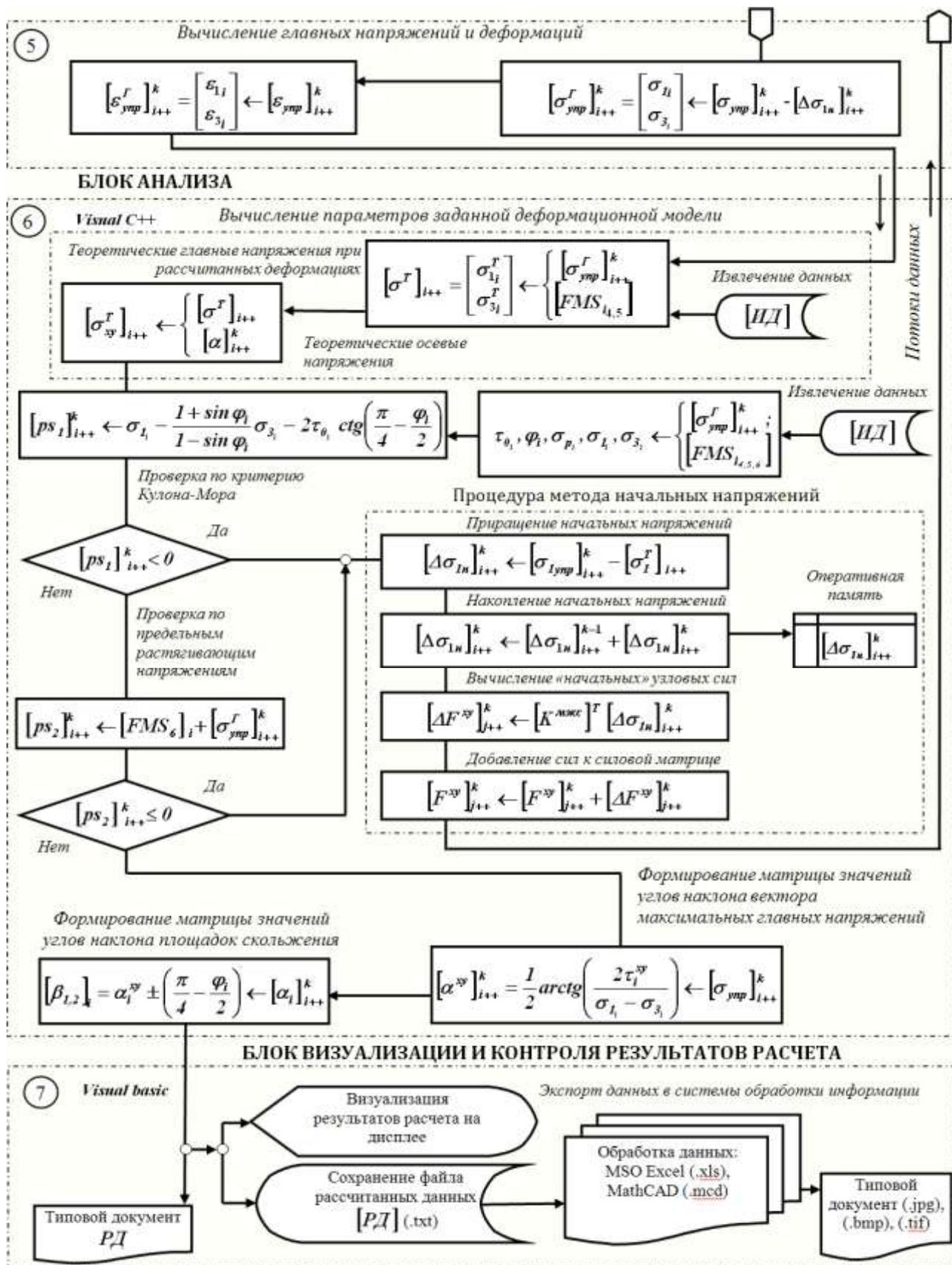


Рис. 1. Лист 2.

подготовительных горных выработок, их ориентация в геопространстве, параметры способов проведения и охраны выработок, а также систем разработки и управления горным давлением в лаве. Имея сведения о параметрах трещиноватости можно техническими средствами управлять сопротивляемостью породного массива и нагрузками на крепи выработок.

Трещины между кристаллами и в межкристаллическом цементе характеризуют микротрещиноватость горной породы, которая влияет на общее снижение ее прочности. Поэтому при расчетах природная трещиноватость принималась как начальная и учитывалась на стадии постановки задачи по данным испытаний ослабленных образцов аналогичных типов пород путем применения коэффициентов структурного ослабления. Участки ослабления массива задавались элементами с пониженными прочностными свойствами, которые заносились в базу исходных данных. Применение коэффициентов структурного ослабления позволило учесть общее снижение прочностных свойств в элементах, моделирующих трещиноватый массив.

Так как техногенные трещины образуются при ведении горных работ, то их можно считать дополнительными, параметры которых зависят от изменения полей напряжений и деформаций. Поэтому их оценка может быть проведена только при анализе результатов расчета. Образование техногенных трещин происходит в результате хрупкого разрушения на микро- или макроуровне. Поэтому при разрушении изотропной породы без выраженной исходной трещиноватости развитие систем техногенных трещин происходит, преимущественно, в направлениях или близких к перпендикулярному максимальным нормальным растягивающим напряжениям в условиях деформации растяжения (трещины отрыва), или по направлению максимальных напряжений сдвига (линий скольжения) в условиях неравнокомпонентного сжатия (трещины скалывания). Трещины отрыва коротки, имеют неровные шероховатые поверхности, чаще всего открытые, широко распространены над выработанным пространством лав. Трещины скалывания более ровные, часто закрытые, вытянуты на большие расстояния в породном массиве и ориентируются в определенной плоскости.

Изображение линий скольжения (вдоль которых направлены максимальные сдвигающие силы) получено Н.С. Булычевым [6] из теоретического расчета только упругой области в результате громоздких вычислений с наложением нескольких слоев кальки. В отличие от известных решений, разработанная технология компьютерного анализа позволяет определять линии скольжения в условиях деформационной упругопластической модели с разупрочнением и учетом остаточной прочности, а также проводить интерактивный анализ всей исследуемой области по главенствующим структурным дефектам в реальном массиве пород. Технология заключается в том, что в результате решения задачи, после исполнения процедуры метода начальных напряжений (блок 6, рис. 1. Лист 2) и вычисления параметров напряженно-деформированного состояния (блок 5, рис. 1. Лист 1), в блоке анализа алгоритма по значениям максимальных σ_1 и минимальных σ_3 главных напряжений, а также касательных напряжений τ_{xy}

(блок 5, рис. 1. Лист 1) по известным соотношениям [3, 6] вычисляется ориентация векторов максимальных главных напряжений для каждого элемента расчетной схемы. В результате вычислений формируется массив $[\alpha^{xy}]_{i++}^k$, содержащий значения углов наклона α_{xy} максимального главного напряжения к координатной оси x :

$$[\alpha^{xy}]_{i++}^k \leftarrow \alpha_{xy} = \frac{1}{2} \arctg \left(\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_1 - \sigma_3} \right) \leftarrow \left\{ [\sigma_{\Gamma}^{\Gamma}]_{i++}^k ; [\sigma_{\text{ynp}}]_{i++}^k \right\}, \quad (1)$$

где $i++$ - инкремент, наращивающий индекс k -го класса до числа элементов; $[\sigma_{\Gamma}^{\Gamma}]$ и $[\sigma_{\text{ynp}}]$ - массивы значений главных и осевых напряжений, соответственно:

$$[\sigma_{\Gamma}^{\Gamma}]_{i++} = \begin{bmatrix} \sigma_{1i} \\ \sigma_{3i} \end{bmatrix} \leftarrow \sigma_1, \sigma_3 = \frac{1}{2} \left((\sigma_x + \sigma_y) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}} \right); \quad (2)$$

$$[\sigma_{\text{ynp}}] = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \leftarrow [UPR_i][\varepsilon_{xy}]_{i++}, \quad (3)$$

где σ_x и σ_y - осевые напряжения, $[UPR]$ - массив коэффициентов упругости элементов, $[\varepsilon_{xy}]$ - массив текущих значений деформаций элементов.

В связи с тем, что механизм пластической деформации связан со сдвигами по площадкам скольжения в неупругом состоянии породы, то в зоне неупругих деформаций реализация условия предельного состояния происходит на двух площадках, наклоненных к максимальному главному сжимающему напряжению под углами $\beta_{1,2}$ [3]:

$$[\beta_{1,2}]_i \leftarrow \beta_{1,2} = \alpha_{xy} \pm \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi_i}{2} \right) \leftarrow [\alpha^{xy}]_{i++}^k, \quad (4)$$

где φ_i - значения углов внутреннего трения элементов модели.

Значения углов внутреннего трения каждого элемента φ_i извлекаются из класса физико-механических свойств модели, затем, путем вычислений по формуле 4, формируется двумерный массив $[\beta_{1,2}]$, содержащий значения углов наклона проекций площадок скольжения на плоскость расчетной схемы для каждого элемента. В результате расчетов эти площадки в блоке визуализации и

контроля результатов отображаются в виде дискретных отрезков, по направлению которых действуют максимальные сдвигающие силы.

Следует выделить один из ключевых моментов, влияющих на разрушение массива пород и заключающийся в том, что системы трещин с одинаковой или близкой ориентировкой развиваются с наибольшей интенсивностью и организовываются в магистральные трещины, которые часто являются причиной аномальных явлений в виде резкого снижения устойчивости и внезапных подвижек пород кровли и почвы, увеличения отжима угля и вмещающих пород, расслоений приконтурной части массива, внезапных обрушений, динамических нагрузок на крепи и др. Большинство таких проявлений горного давления сопровождается выделением газа в выработки. Так как наличие природных структурных дефектов и структурных неоднородностей свойственно всем горным породам, в модели учтен тот факт, что возникновение новых систем трещиноватости при ведении горных работ и формирование участков разрушения в условиях девиаторного нагружения происходит, в основном, по существующим системам естественной трещиноватости и структурным дефектам в породном массиве. В связи этим, в блок анализа алгоритма программного комплекса введены новые параметры: угол направления превалирующих структурных дефектов и угол, характеризующий степень совпадения направления структурного дефекта с направлением максимального сдвигающего напряжения. Совпадение указанных направлений с заданной точностью (в градусах) в блоке визуализации выделяется жирными линиями.

Разработана и введена в программный комплекс новая сервисная функция расчета направлений действия максимальных главных и сдвиговых напряжений, которая дает возможность в интерактивном режиме установить углы наклона структурных дефектов в двух произвольных направлениях и, таким образом, задать в модели две доминирующие системы природной трещиноватости. Разработан и апробирован модуль расчета и визуализации линий скольжения, который подключен к программному комплексу и был использован для автоматизации графической обработки результатов вычислений.

Сравнение расчетных областей сдвигов по радиальным поверхностям скольжения с известным решением (по К. Терцаги, рис. 2, а [7]) проведено на примере воздействия штампа на связную весомую область в условиях предельной критической нагрузки. Исследована область размерами 40×20 м. Свойства породы: модуль упругости $4,42 \times 10^4$ МПа, коэффициент Пуассона 0,3, объемный вес 2,6 т/м³, сцепление 9 МПа, угол внутреннего трения 33°. Штмп задан путем приложения распределенной нагрузки по верхней границе расчетной схемы. Предельная критическая нагрузка для данных условий определена путем постепенного увеличения значений сил, моделирующих штамп, до величины, соответствующей моменту выхода одного из элементов в неупругое состояние. Такое напряженно-деформированное состояние зафиксировано и показано на рис. 2, б. С диаграммой максимальных главных напряжений совмещена карта площадок скольжения, которые были определены для каждого элемента расчетной схемы.

Известно, что под действием штампа образуются три условных зоны (рис. 2, а). Непосредственно под штампом образуется зона сжатия в виде упругого «ядра» (зона I), которое «выталкивает» породу в разных направлениях. На границах этой зоны создаются условия предельного состояния и происходит зарождение участков разрушения, что подтверждено численным экспериментом с более высокой нагрузкой на штамп. Зона II характеризуется нарастанием сдвигающих усилий в разные стороны от ядра сжатия. Теоретически зона II (область сдвигов по радиальным поверхностям скольжения) имеет только условные параметры (вид, форма), так как ее реальные геометрические размеры и положение граничной линии не определены однозначно. Тем не менее, расчетами МКЭ граничная линия зоны II определяется однозначно как граница между упорядоченными и неупорядоченными линиями скольжения (обозначена мелким пунктиром). Это видно на рис. 2, б, ее глубина составляет $\approx 6,0$ м. В отличие от зоны II в зоне III линии скольжения расположены хаотично, деформации характеризуются смещениями части массива в сторону открытого пространства (граница показана пунктиром). Моделирование позволило определить ее реальные геометрические параметры (глубину, ширину, конфигурацию). Как видно из сравнения рисунков 2, а, б, тип зон, их расположение и конфигурация, линии скольжения и граничные линии между участками различных по типу деформаций соответствуют теоретическим представлениям НДС пород в условиях предельной нагрузки.

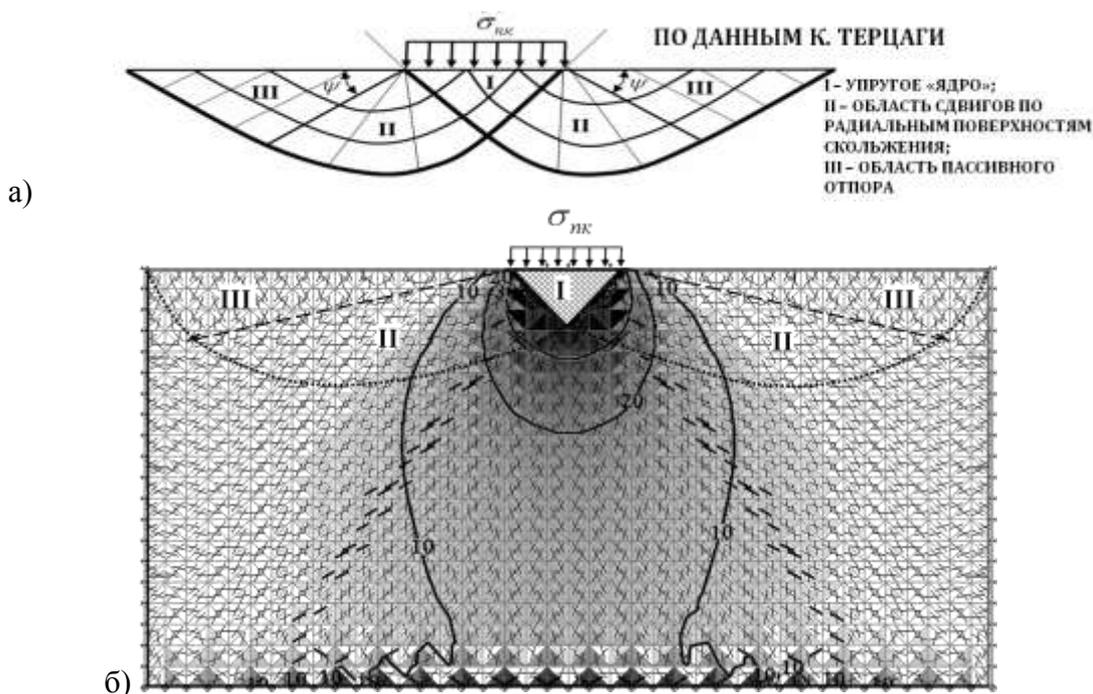


Рис. 2. – Сравнительный анализ областей сдвигов по радиальным поверхностям скольжения в условиях предельной критической нагрузки (напряжения указаны в МПа):

а – по данным К. Терцаги [7];

б – по результатам математического моделирования.

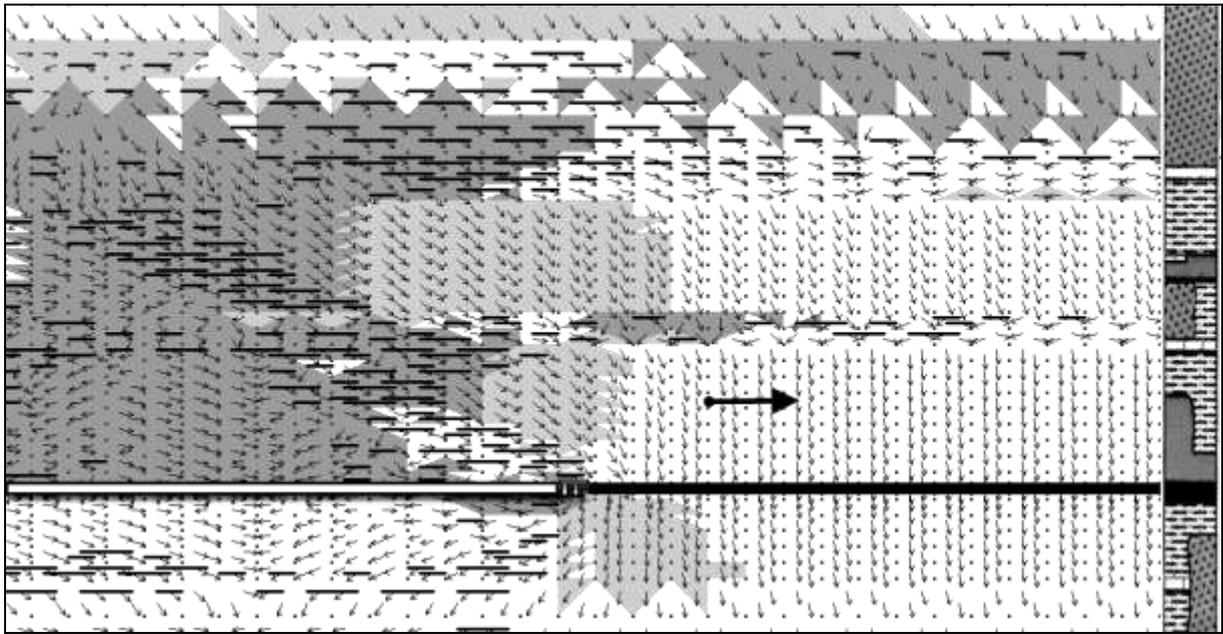
На рис. 3 показаны диаграммы ориентации максимальных главных напряжений и систем трещиноватости, полученные в результате расчета многоком-

понентной имитационной геомеханической модели для условий 18 западной лавы пласта m_3 горизонта 1340 м, АП «Шахта им. А.Ф. Засядько». Достоверность результатов численного анализа и их соответствие реальным деформационным процессам в породном массиве достигалась схематизацией и внедрением в геомеханическую модель особенностей и отдельных параметров, определенных экспериментальными исследованиями и присущими изучаемому массиву. Взаимосвязь между полученными с помощью шахтных наблюдений значениями и численным моделированием установлена на основании данных шахтных исследований по расширению трещин и расположению относительно выработки расслоений массива, смещениям и конвергенции кровли-почвы выработки, контролю границы зоны неупругих деформаций.

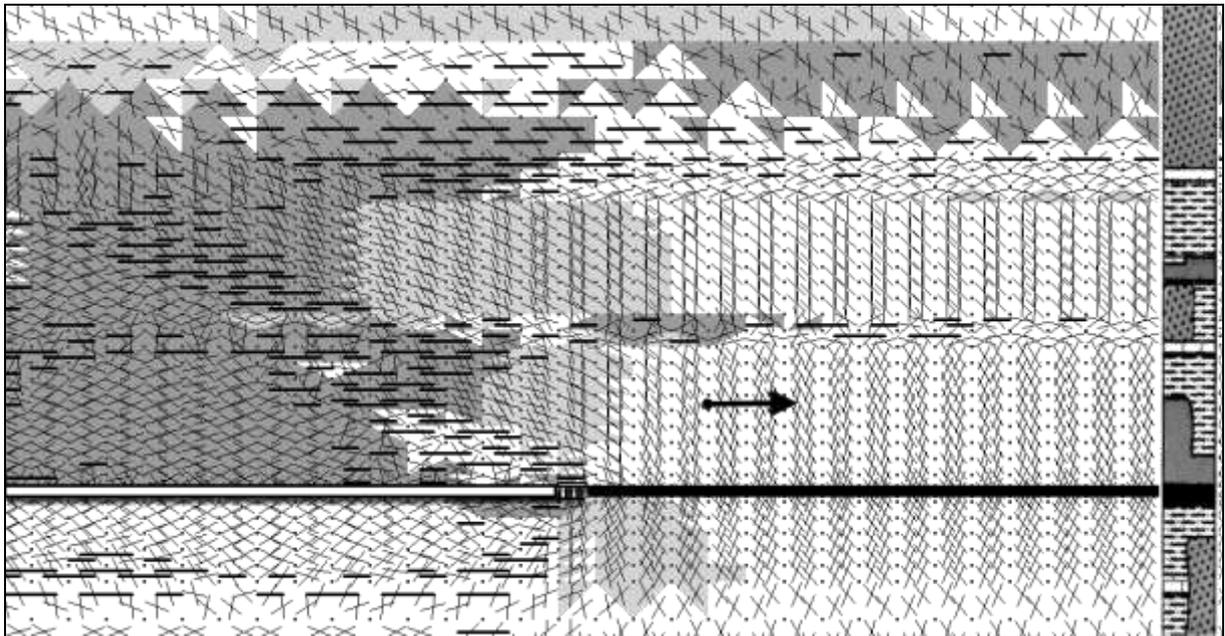
Анализ направлений площадок скольжения показал, что они упорядочиваются в зонах неупругих деформаций, где в условиях сдвига дислокаций формируются отслаивающиеся блоки. Перед разрушением участков массива в них происходит изменение ориентации сосредоточенных сдвиговых усилий, которые способствуют возникновению направленной трещиноватости. Системы трещиноватости в основной кровле развиваются в близком к горизонтальному и вертикальному направлениях. Над выработанным пространством техногенные трещины образуют плоскости расслоения. В зоне очистного забоя линии скольжения расположены параллельно обнаженной поверхности, а в почве и кровле, в результате сдвига формируются горизонтальные расслоения.

Таким образом, впервые предложена математическая модель, позволяющая на основе расчета процедурами имитационного моделирования методом конечных элементов возможных направлений площадок скольжения и разрыва связей в элементах модели определять ориентацию систем доминирующей техногенной трещиноватости с учетом природных структурных дефектов в реальном массиве пород. Несмотря на определенную идеализацию, которая свойственна любому процессу моделирования, разработанная компьютерного анализа обладает существенными преимуществами, так как открывает новые широкие возможности оценки напряженно-деформированного состояния породного массива, определения зональности и интенсивности трещиноватости, границ зон дезинтеграции слоистых пород, прогнозировать наиболее вероятные ориентацию и расположение техногенных трещин, а, следовательно, более детально исследовать сложные геомеханические процессы. Это позволяет корректно определять технические и технологические параметры горных работ.

Внедрение в производство рекомендаций по комплексному мониторингу проявлений горного давления и повышению устойчивости подготовительных выработок, разработанных на базе обоснования силовых характеристик системы крепь-массив с учетом тектонической активности, неупругих деформаций и техногенной трещиноватости структурно-неоднородных пород под влиянием очистных работ, позволили получить фактический экономический эффект, что



а)



б)

-  – зона разрыва сплошности в условиях растяжения;
-  – зона неупругих деформаций в условиях неравнокомпонентного сжатия;
-  – зона упругого деформирования;
-  – направления векторов максимальных главных напряжений;
-  – ориентация двух площадок скольжения в каждом элементе расчетной схемы;
-  – линии скольжения, совпадающие с направлением слоистости массива ($\pm 3^\circ$);
-  – направление подвигания очистного забоя.

Рис. 3 – Анализ ориентации техногенных трещин вокруг очистного забоя (продольный разрез, пласт m_3 , АП «Шахта им. А.Ф. Засядько», горизонт 1340 м): а – по направлениям максимальных главных напряжений; б – по направлениям максимальных тангенциальных напряжений.