

ПЕРЕХОД КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ В НОВОЕ КАЧЕСТВО, ИЛИ ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ АНАЛИТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ГЕОМЕХАНИКЕ

А.Н. Шашенко, ГВУЗ «Национальный горный университет», Украина

Проанализирован путь совершенствования физических моделей в геомеханике. Обозначены проблемные ситуации, связанные с усложнением моделей, и переходом к численным методам исследований. Как единственно возможный отмечен комплексный метод решения геомеханических задач, заключающихся в объединении лабораторных, натуральных и аналитических исследований.

На написание настоящей статьи автора натолкнула публикация профессора Б.А. Картозии «Об одной юбилейной дате и ситуации в аналитической геомеханике» (Горный бюллетень. № 10. – 2010. с 14-18). Не во всем соглашаясь с оценкой общего состояния, сложившегося в настоящий момент в аналитической геомеханике, которое по сути оценивается автором, как тупиковое, с анализом применяемых в ней моделей и методов их изучения, я, тем не менее, разделяю главный, на мой взгляд, вывод, следующий из приведенной выше публикации: **применение аналитических решений в практических целях должно быть крайне осторожным, предельно аккуратным, корректным на всех этапах исследований и в значительной мере опираться на результаты натуральных и лабораторной измерений.**

Любая отрасль науки может быть рассмотрена, как некоторая развивающаяся система получения, накопления и анализа информации в отношении того или иного объекта исследований. Применительно к геомеханике таким объектом является породный массив, ослабленный системой горных выработок. Тупиковые ситуации, на чем сделан акцент в рассмотренной выше в статье профессора Б.А. Картозии, возникают в процессе выполнения исследований постоянно по мере накопления информации на предыдущем временном этапе и довольно быстрого, подчас революционного, перехода ее количества в новое качество, благодаря чему, собственно, и происходит дальнейшее развитие науки. Момент перехода системы знаний из одного состояния в другое почти неизбежно сопровождается некоторым замедлением ее поступательного движения, кажущейся стагнацией, которая необходима для осмысления накопленной прежде информации, рождения новой Идеи, столь необходимой для последующего рывка вперед, к новым знаниям и новым задачам.

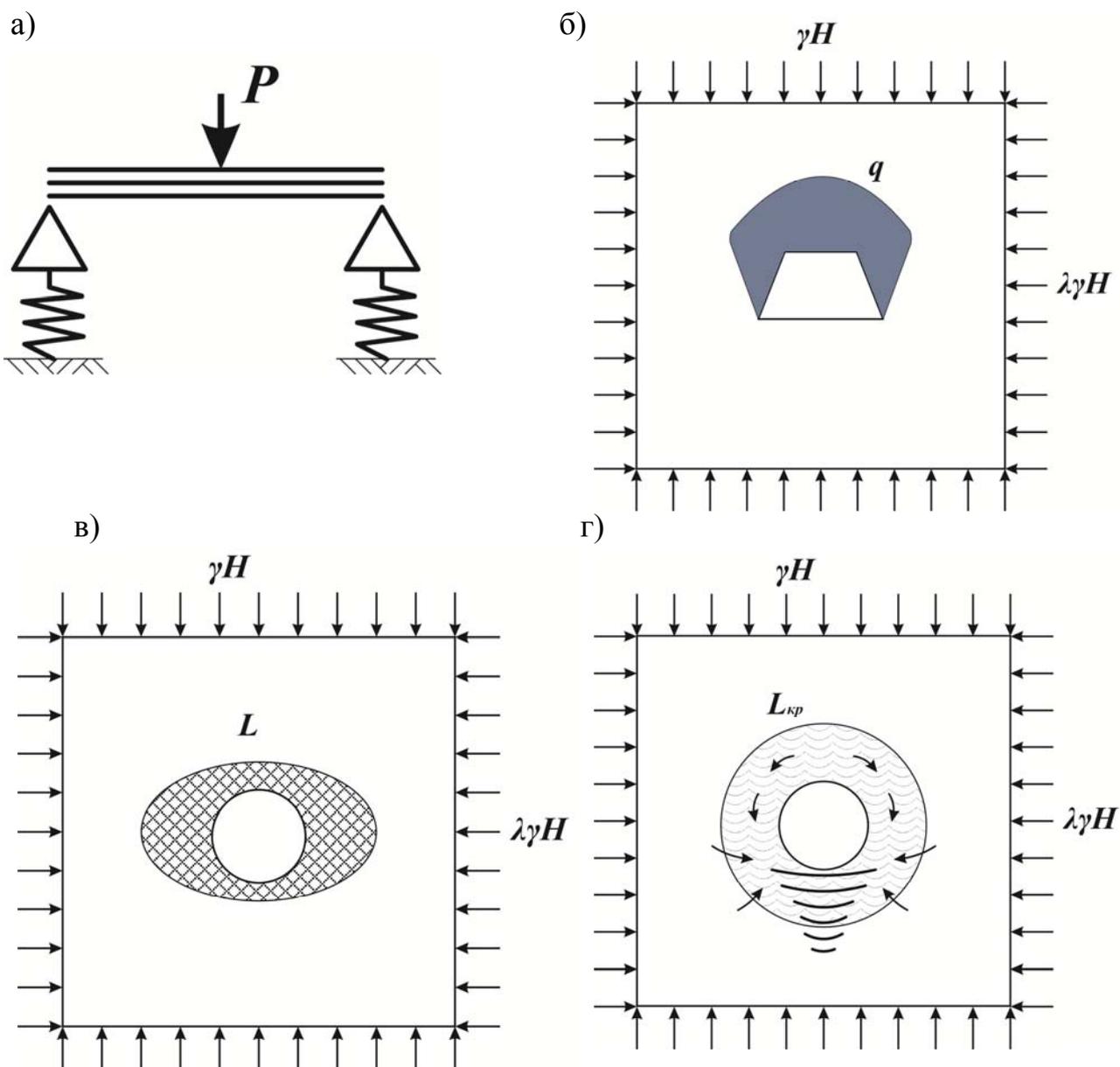
В свое время книга К.В. Руппенейта и Ю.М. Либермана «Введение в механику горных пород» [1] произвела качественный переворот в геомеханике не только отечественной, но и зарубежной. Ей предшествовала не менее значимая и глубокая по содержанию монография К.В. Руппенейта «Некоторые вопросы механики горных пород» [2]. Оба труда, после некоторого застоя в геомеханике, заложили методические основы будущих многолетних, и не только аналитических, исследований в области прогноза поведения породного массива, содержащего горные выработки. Они во многом позволили исследователям преодолеть психологический барьер, стоящий на пути использования соотношений механики твердого деформируемого тела применительно к сложноструктурному породному массиву.

В своем становлении аналитическая геомеханика прошла несколько этапов, усложняя и совершенствуя методы исследований и изучаемые модели (рис. 1). Вначале это были простейшие модели в виде плит и балок (рис. 1, а,б), в основе которых лежали соотношения строительной механики (М.М. Протождяконов, П.М. Цимбаревич, Ф.А. Белаенко и др.). Затем модели усложняются и предпринимаются робкие попытки применения уравнений теории упругости (А.Н. Динник, Ф.А. Белаенко и др.). Чуть позже Р. Феннер и А. Лабасс принимают первые шаги к исследованию упруго-пластических моделей (рис. 1,в).

К этому времени К.В. Руппенейт и Ю.М. Либерман в своих монографиях, о которых упоминалось выше, разрабатывают полноценную методологию исследований в области изучения устойчивости подземных выработок.

Количество работ в геомеханике растет лавинообразно, охватывая практически все проблемы, возникающие при разработке месторождений полезных ископаемых. Появляются работы А.В. Баклашова, В.В. Виноградова, В.Т. Глушко, Ю.З. Заславского, А.Н. Зорина, Б.А. Картозии, Г.Т. Кирничанского, Г.Г. Литвинского, А.П. Максимова, Л.Я. Парчевского, А.Г. Протосени, А.Н. Ставрогина, А.Н. Шашенко, Е.И. Шемякина и многих других авторов. Глубокие исследования выполняются в области реологии горных пород (Ж.С. Ержанов, М.И. Розовский, Л.Я. Парчевский и др.) На их основе разрабатывается ряд нормативных документов [3], позволяющих обосновано проектировать подземные выработки.

Увеличение глубины ведения горных работ привело к интенсификации пучения пород в горных выработках, внезапных выбросов угля, породы и газа. Для их описания разрабатываются модели, имитирующие потерю упруго-пластической устойчивости (рис. 1,г). Работы научными коллективами в этом направлении ведутся Днепропетровским, Ленинградским и Московским горными институтами, Донецким политехническим институтом, ВНИМИ, ИГД им. А.А. Скочинского.



д)

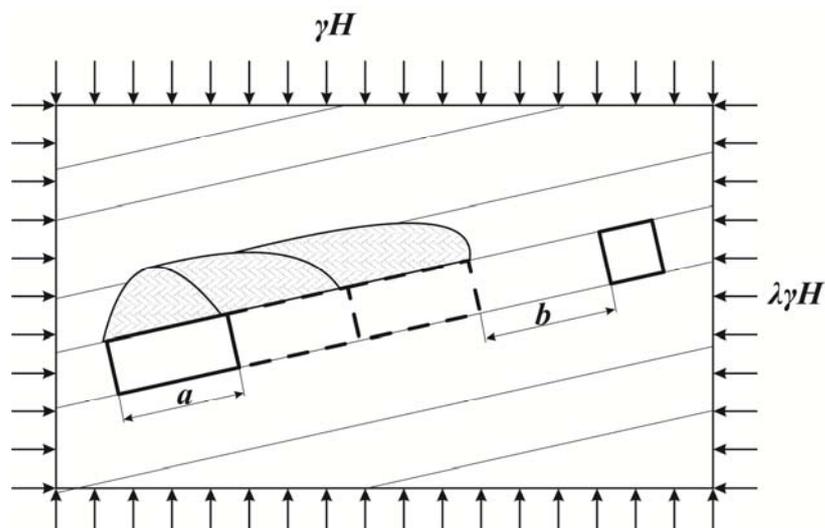


Рис. 1. Эволюция моделей, применяемых в геомеханике: а) гипотеза балок и плит; б) гипотеза сводообразования; в) упругопластическая задача; г) потеря упругопластической устойчивости; д) многосвязная среда с отверстиями сложной формы

И вслед за этим, как и за каждым предыдущим периодом, образовался информационный тупик. Аналитические методы в геомеханике исчерпали свои возможности, что вполне естественно в силу чрезвычайной сложности стохастического по своей природе объекта изучения: высоконагруженного сложноструктурного породного массива ослабленного горными выработками. Физические и составляемые на их основе математические модели на пути приближения к реальным условиям достигли того уровня сложности, после которого дальнейшее их совершенствование потеряло смысл, а их адекватность стала подвергаться вполне обоснованному сомнению. Но, вскоре, выход был найден после того, как персональный компьютер стал необходимым атрибутом ученого, а его быстро растущие возможности позволяют уже сейчас моделировать физические объекты практически любой сложности, приближая численные методы исследований по точности к аналитическим (рис. 1, д).

Следует отметить, что в основе численных методов решения геомеханических задач лежат те же уравнения механики деформируемого твердого тела, что и в случае точных аналитических решений, основанные на одинаковых, достаточно глубоко обоснованных, допущениях. Сегодня на рынке присутствует довольно много программных продуктов, позволяющих решать широкий класс как объемных, так и плоских прикладных задач в области горного дела. Это “Cosmos-M”, “Ansis”, “Solid works”, “Fase-2”, “Flag” и другие менее известные авторские программные продукты. Практически все они основаны на применении метода конечных элементов, или конечных разностей, как наиболее гибкого инструмента исследований, позволяющего создавать довольно точные модели породной среды, в т.ч. обладающей весом и сложной структурой.

Таким образом, на первый взгляд, проблема прогноза поведения породного массива, ослабленного горными выработками, кажется в известной степени решенной. Однако, к сожалению, на этом оптимистическая часть повествования завершается.

Создание компьютерных моделей требует не менее тщательного подхода, чем при решении аналитических задач. Но, если последние достаточно легко проверить с точки зрения правомерности принятия тех или иных допущений при составлении физических и математических моделей, обоснованности граничных и начальных условий, корректности хода решения самой задачи и последующего анализа полученных соотношений, то этого нельзя сказать о численных моделях, реализуемых с помощью соответствующих программных средств.

Процесс создания инструмента исследований скрыт в программе, и проверить правомерность его использования можно только, например, с помощью некоторых тестовых задач, правильность постановки и решения которых не вызывает сомнения. При решении задач в упругой постановке это может быть, например, известная задача Ламе, в неупругой – любая проверенная упругопластическая задача с соответствующим условием прочности, для среды с разрыхлением и без разрыхления, позволяющая получить такие размеры области разрушения вокруг выработки и перемещения на контуре, которые совпадают с измерениями в натуре или близкие к ним. При этом условие разрушения горных пород и в тестовой задаче и в инструменте численного моделирования должно быть одинаковым.

Нередко упреки в сторону численных (или аналитических) методов исследований в геомеханике состоят в том, что в исследуемых моделях используются такие предположения как, «невесомая среда», «однородное изотропное тело». Между тем, допущения о невесомости исследуемого пространства вполне правомерно для упругих моделей. При расположении одиночной выработки на определенной глубине (достаточно небольшой) воздействие ее на породный массив локально, уровень напряжений в ее окрестности настолько высок, что собственный вес пород на его фоне незначителен и им можно вполне обосновано пренебречь, приложив нагрузку к границам исследуемой, теперь уже невесомой, области. Если рассмотреть для этого случая напряженно-деформированное состояние (НДС) ослабленного одиночной выработкой реального породного массива, обладающего структурой, содержащего различного рода дефекты (рис. 2,а) то его всегда можно заменить однородной изотропной средой, НДС которой с достаточной точностью совпадает с реальным объектом (рис. 2,б)

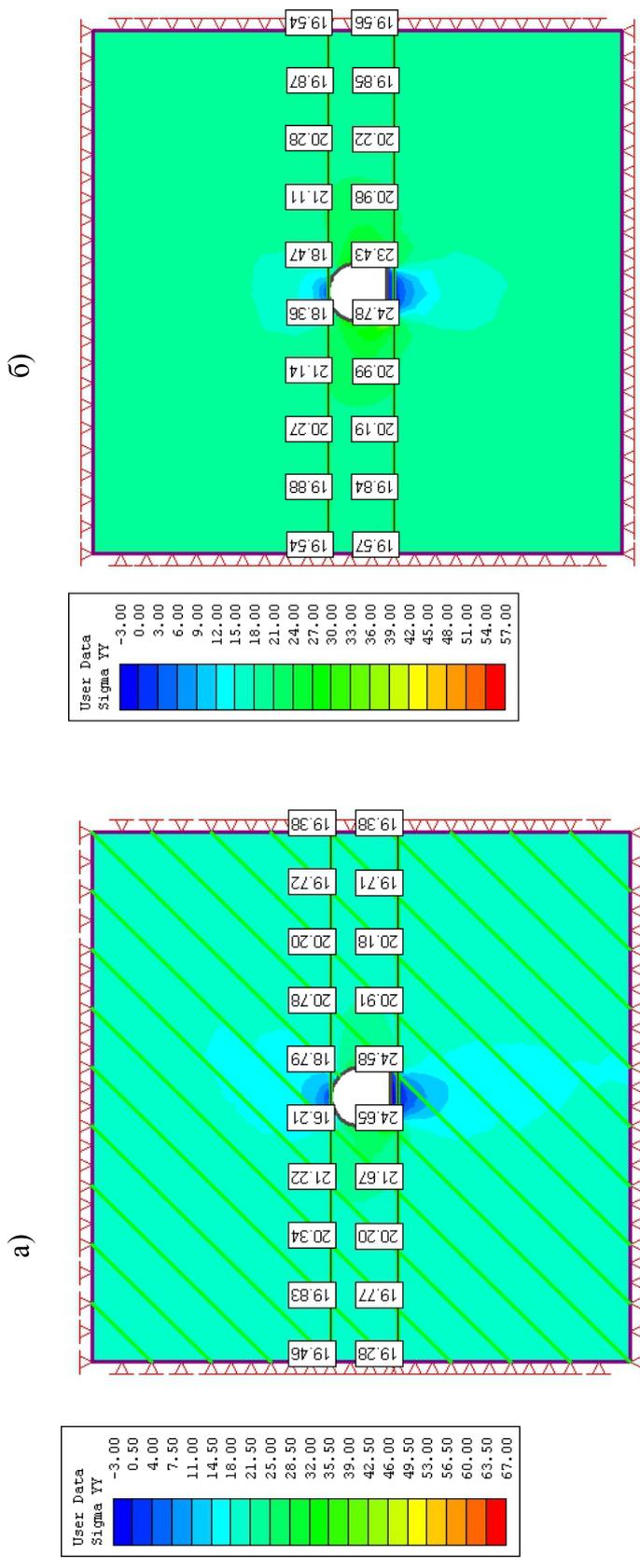


Рис. 2. Распределение вертикальных напряжений вокруг одиночной выработки для упругой среды со структурой (а) и без структуры (б)

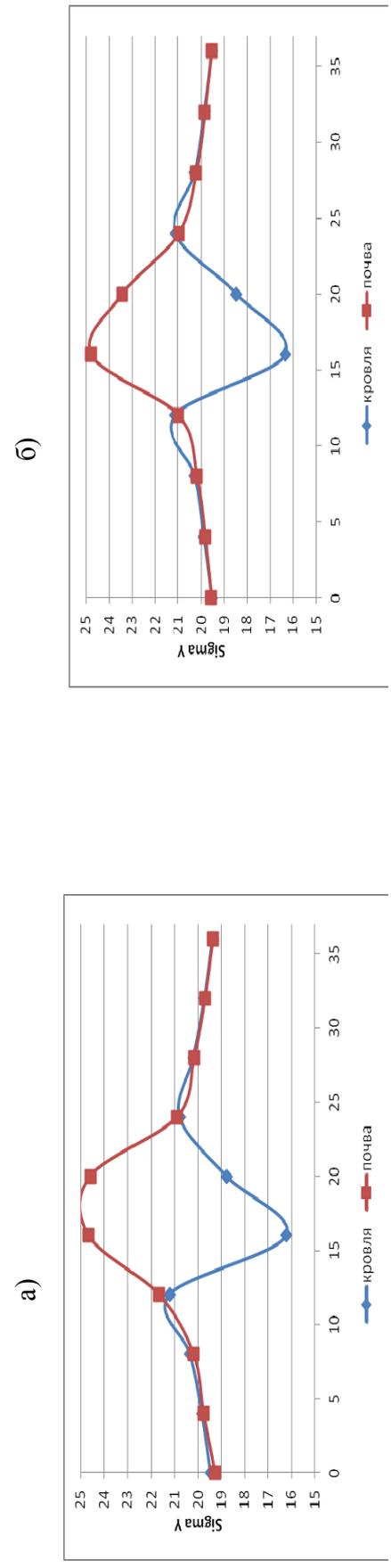


Рис. 3. Распределение вертикальных напряжений в кровле и почве выработки для слоистой (а) и однородной модели (б)

При этом весьма важной и существенной является проблема обоснованной замены физико-механических характеристик при переходе от структурной к бесструктурной среде. В геомеханике она носит название масштабного эффекта и в этом направлении ведется, а вернее сказать велась, большая работа [4, 5], поскольку в последние 15-20 лет публикаций по этой теме практически не было.

При расположении горных выработок на глубинах, превышающих некоторый критический предел

$$H \succ H_{кр} = \frac{R_c k_c}{2k\gamma}, \quad (1)$$

где R_c - предел прочности пород на одноосное сжатие, k_c - коэффициент структурного ослабления породного массива, k - коэффициент концентрации напряжений и γ - объемный вес вмещающих горных пород, применение упругих моделей является неправомерным. Вокруг выработки образуется обширная зона неупругих деформаций (ЗНД) с пониженным уровнем напряжений, величина, которых сопоставима с собственным весом пород в ее пределах (рис. 4). В этой связи допущение о невесомости породной среды в окрестности выработки теряет свою силу и является неприемлемым. Аналитически такие задачи решаются достаточно сложным образом и только для простых объектов (гидростатически нагруженный массив, содержащий ограниченное число горных выработок, имеющих круглую форму). Можно считать доказанным тот факт, что разрушение горных пород в окрестности протяженной выработки, расположенных вне зоны влияния очистных работ, протекает в режиме заданных деформаций. Роль обычного жесткого пресса при этом выполняет упруго деформирующаяся часть массива.

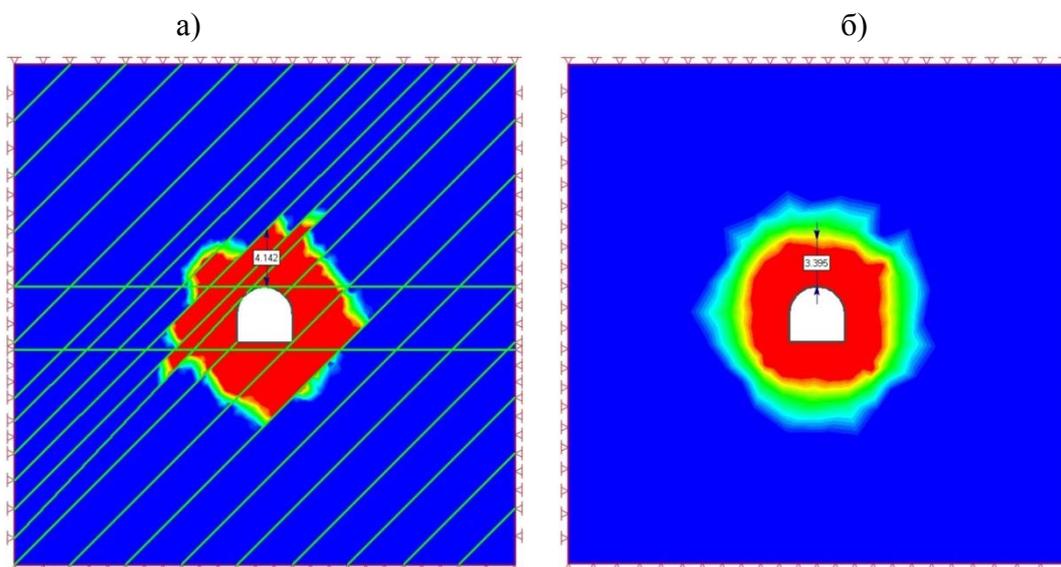


Рис. 4. Конфигурация зоны неупругих деформаций вокруг выработки в среде со структурой (а) и без структуры (б)

Физические уравнения, описывающие такое разрушение горных пород, должны отражать закономерности этого нелинейного процесса, заключающиеся в постепенном разрушении структурных связей и накоплению повреждений (микротрещины Гриффитса) по мере приближения к контуру выработки, что в конечном итоге проявляется в виде зоны неупругих деформаций и значительных (20-30 см и более) перемещений на контуре выработки.

Таким образом, соответствие численной модели (весомая среда со структурой, разрушающаяся в режиме заданных деформаций) реальному объекту может быть определено либо по соответствию некоторой тестовой задаче, которая также прошла достаточно полную верифи-

кацию [4], либо по результатам натуральных измерений главных параметров упругопластического состояния исследуемого объекта: размеров ЗНД и перемещений на контуре выработки. Исследования показывают, что при соблюдении некоторой единой методики прогноз геомеханической ситуации в окрестности подземных выработок может быть вполне приемлем для его реального использования. По мере же накопления натуральных измерений для конкретного объекта и внесения на этой основе поправок в исходную математическую модель, прогноз становится все более точным.

Хорошей иллюстрацией сказанного является геомеханическое сопровождение внедрения струговой технологии выемки угольных пластов в условиях шахт Западного Донбасса (рис. 5). В ходе промышленного эксперимента различия прогнозируемых параметров и реально измеренных в выработках не превышало 10 %. Но процесс адаптации численной модели для горно-геологических условий конкретной выработки потребовал разработки соответствующих технологических приемов, проведения обширных натуральных и лабораторных исследований.

Исследование упругих моделей для решения геомеханических задач предполагает, что максимальные относительные деформации изучаемого объекта будут составлять 2-3 %.

Применение упругопластических моделей в случае расположения объекта на больших глубинах позволяет в процессе решения задачи получить на контуре одиночной выработки максимальные относительные перемещения, равные, примерно, $\frac{U_0}{R_0} \approx 0,01$. Здесь U_0 - абсолютное значение перемещений контура выработки, R_0 - полупролет выработки. При этом, как показывают натурные измерения, величина ЗНД составляет $3,0 - 3,5R_0$. Эти параметры ограничивают возможность дальнейшего прямого применения упругопластических моделей.

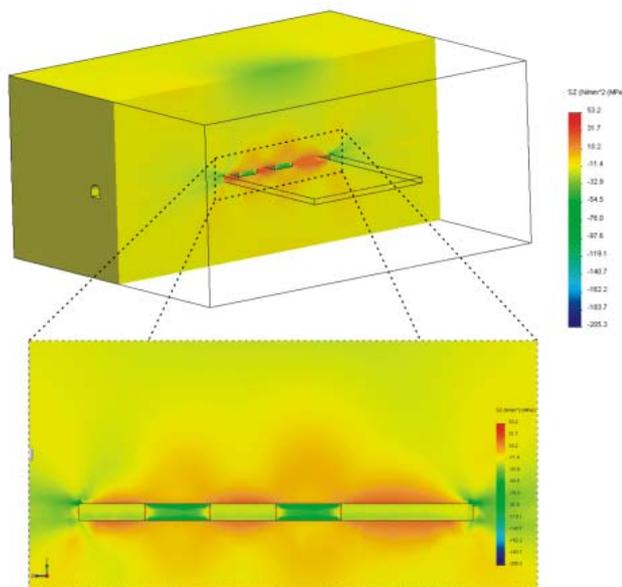


Рис. 5. Имитация пошагового перемещения забоя струговой лавы в численной модели

Последующее увеличение глубины разработки, соответствующее увеличению внешней нагрузки в моделях, приводит к явлению, именуемому в физике потеря упругопластической устойчивости. В выработках это проявляется в виде пучения пород почвы выработки. В настоящее время теория потери упругопластической устойчивости для трехмерных тел не разработана в такой степени, чтобы ее можно было использовать для непосредственного формирования численных моделей. Работы в этом направлении в свое время велись М.Т. Алимжановым [6], А.Н. Гузем [7], А.К. Ишлинским [8], В.Д. Ключниковым [9],

Л.С. Лейбензоном [10], А.Н. Шашенко [11], но сейчас публикации по обозначенной теме практически отсутствуют.

Прямое использование упругопластических моделей при исследовании феномена вспучивания пород лавы в горных выработках невозможно, но использование их в комбинации с результатами натуральных измерений позволяет получить неплохие результаты (рис. 6) [12].

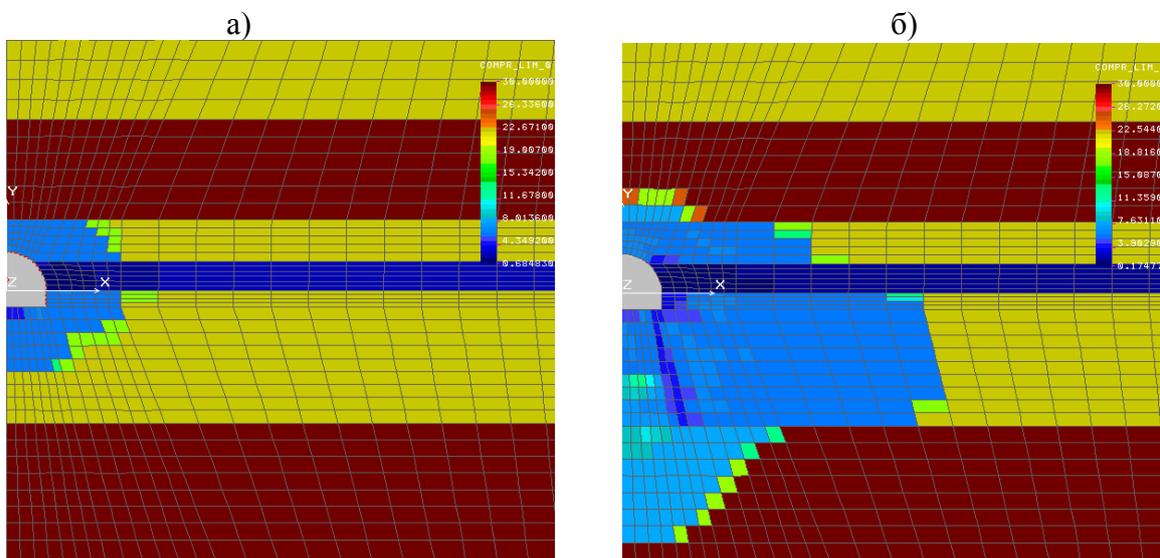


Рис. 6. Конфигурация зоны неупругих деформаций вокруг выработки без пучения пород почвы (а) и при пучении (б)

Таким образом, тупик, в который зашла аналитическая геомеханика, это явление временное. Он имеет выход, благодаря корректному использованию численных методов решения геомеханических задач, моделей, основанных в значительной мере на результатах лабораторных и натуральных измерений.

Список литературы

1. Руппенейт К.В. Введение в механику горных пород / К.В. Руппенейт, Ю.М. Либерман. – М.: Гос. научно-техн. изд-во литературы по горному делу, 1960. – 366 с.
2. Руппенейт К.В. Некоторые вопросы механики горных пород / К.В. Руппенейт. – М.: Углетехиздат, 1954. – 383 с.
3. СНИП II-94-80. Подземные горные выработки. Нормы проектирования. – М.: Стройиздат, 1982. – 272 с.
4. Шашенко А.Н. Масштабный эффект в горных породах / А.Н. Шашенко, Е.А. Сдвижкова, С.В. Кужель. – Донецк: Норд-Пресс, 2004. – 126 с.
5. Шашенко А.Н. Некоторые задачи статистической геомеханики / А.Н. Шашенко, С.Б. Тулуб, Е.А. Сдвижкова. – К.: Пульсары, 2002. – 304 с.
6. Алимжанов М.Т. Устойчивость равновесия тел и некоторые задачи горного давления / М.Т. Алимжанов, Л.В. Ершов // Проблемы механики твердого деформируемого тела. – Л., 1970. – С. 47 – 54.
7. Гузь А.Н. Основы трехмерной теории устойчивости деформируемых тел / А.Н. Гузь – К.: Вища школа, 1986. – 511 с.
8. Ишлинский А.К. Рассмотрение вопросов об устойчивости равновесия упругих тел с точки зрения математической теории упругости / А.К. Ишлинский // Укр. мат. журн. – 1954. – Т. 6, № 2 – С. 140-146.
9. Ключников В.Д. Устойчивость упругопластических систем / В.Д. Ключников – М.: Наука, 1980. – 240 с.

10. Лейбензон Л.С. О применении гармонических функций к вопросу об устойчивости сферической и цилиндрической оболочек / Л.С. Лейбензон – М.: Изд-во АН СССР., 1951.-Т. 1. – С. 50 – 85.
11. Шашенко А.Н. Методы теории вероятностей в геомеханике / А.Н. Шашенко, Н.С. Сургай, Л.Я. Парчевский. – К.: Техніка, 1994. – 216 с.
12. Гапеев С.Н. Исследование процесса потери упругопластической устойчивости массива в окрестности одиночной выработки численными методами / С.Н. Гапеев // Известия Тульского государственного университета. Серия «Геомеханика. Механика подземных сооружений». – Тула: изд-во ТулГУ, 2003. – Вып. 1. – С. 65-69.