

УДК 622.831:622.272:004.421

**В.Н. Фрянов, К.Д. Лукин, О.А. Петрова, В.О. Шеховцова,
О.В. Фрянова**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ФОРМИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ПОВРЕЖДЕНИЙ
В ГЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ АКТИВНЫХ ЗОНАХ
УГЛЕПОРОДНОГО МАССИВА ПОД ВЛИЯНИЕМ
ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК ***

Приведены результаты математического моделирования процессов формирования напряженно-деформированного состояния в геотектонических активных зонах при подземной разработке угольных месторождений.

Ключевые слова: углепородный массив, горная выработка, напряжения, деформации, геотектонические блоки, математическая модель, компьютерная программа, закономерности.

Разработана и реализована в компьютерном варианте модель формирования напряжений, деформаций и повреждений в иерархически структурированном углепородном массиве при интегральном влиянии гравитационного, геотектонического и техногенного полей напряжений.

При решении геомеханических задач неоднородного горного массива в зоне влияния горных выработок кроме разломов, структурных блоков и их пересечений, линеаментов, локальных геологических нарушений разрывного типа следует учитывать форму и размеры системы горных выработок, дополнительные напряжения и деформации, возникающие под влиянием веса подработанных горных пород. Под влиянием горных выработок создается техногенное поле напряжений и деформаций. Наложение гравитационных, геотектони-

ческих и техногенных полей напряжений приводит к формированию техногенных трещин в горном массиве или разрушению горных пород. В этой связи актуальными научно-практическими задачами являются: прогноз напряженно-деформированного состояния углепородного массива в сложных горно-геологических и горнотехнических условиях; выявление закономерностей взаимодействия гравитационных, геотектонических и техногенных полей напряжений прогноз для профилактики опасных газодинамических явлений.

Для исследования закономерностей распределения напряжений, деформаций и повреждений в анизотропном углепородном массиве с учетом гравитационного и геотектонического полей напряжений использован алгоритм и программное обеспечение, разработанные в СибГИУ [1, 2] и адаптированные для решения по-

* Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП по контракту №16.740.11.0186.

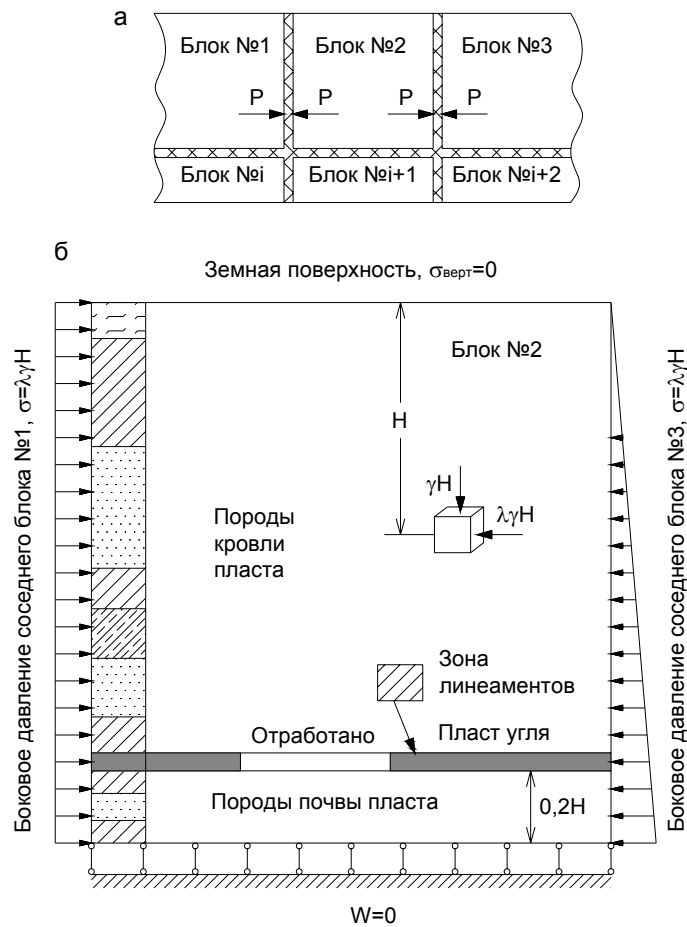


Рис. 1. Схема деления геосреды на структурные тектонические блоки (а) и граничные условия блока №2 (б)

ставленных в настоящей статье задач.

Рассматривается вертикальный разрез углепородного массива в виде системы структурных блоков (на рис. 1, а блоки 1, 2, 3, ..., i , $i+1$, $i+2$). На границах блоков возникают тектонические и гравитационные силы, которые приводят к перераспределению напряжений внутри блоков.

Для моделирования процессов деформирования пород в блоках принят блок №2 (рис. 1, б), расположенный по бокам между блоками 1 и 2, и снизу ограниченный блоком $i+1$. Блок №2 представлен разнородными

породными слоями и угольными пластами, которые частично отработаны. Модули упругости и коэффициенты Пуассона соседних слоев могут существенно отличаться. Сверху модель ограничена земной поверхностью, снизу — зоной наработки величиной $0,2H$, где H — глубина залегания отработываемого пласта. Длина разреза по простиранию пласта зависит от размеров структурных блоков и выработки и определяется по «Правилам охраны...» [1]. На нижней части модели вертикальные перемещения $W=0$, на левом и правом боках модели

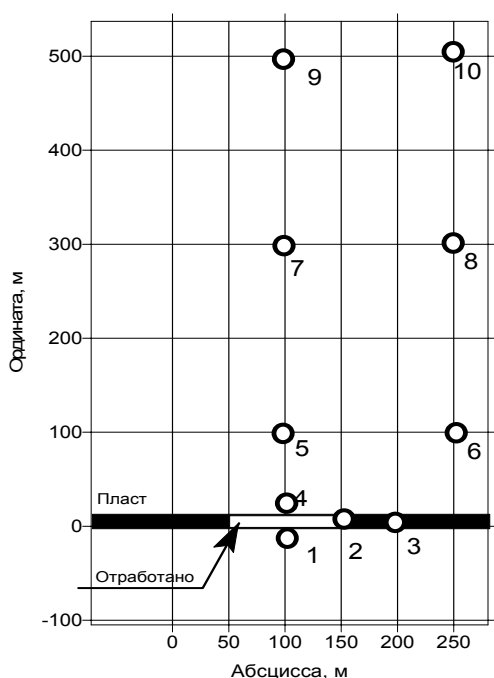


Рис. 2. Схема расположения характерных точек модели

горизонтальные перемещения зависят от бокового давления соседних блоков. На земной поверхности нагрузка равна нулю.

С правой и левой сторон модели приложена нагрузка, соответствующая давлению соседних структурных блоков. Нагрузка распределена на вершины конечных элементов на боках модели в виде эпюры, форма которой может быть задана в виде произвольной функции. На рис. 1, б справа показана эпюра давления треугольной формы, пропорциональная глубине разработки H и коэффициенту бокового давления λ , а с левой — прямоугольной формы. Вертикальная нагрузка задана весом пород γH , где γ — удельный вес пород. Влияние нижнего блока № $i+1$ на основание блока №2 учитывается величиной вертикальных перемещений W . На рисунке 1 $W=0$.

Алгоритм расчета параметров напряженно-деформированного состояния геосреды разработан на основе дифференциальных уравнений механики сплошной среды, с решением их численным методом конечных элементов. На первом этапе решается упругая задача, потом вычисляются с использованием экспериментальных диаграмм «напряжение-деформация» модули деформаций пород на участке упруго-пластического и запредельного деформирования. По паспорту прочности пород с криволинейной огибающей кругов Мора вычисляется отношение прочности пород по формуле

$$\theta_{ост} = \frac{\tau_{пасп}}{\tau_{МКЭ}}, \quad (1)$$

где $\tau_{пасп}$ — касательные напряжения по паспорту прочности породы в конечном элементе; $\tau_{МКЭ}$ — касательные напряжения, вычисленные методом конечных элементов; $\theta_{ост}$ — отношение касательных напряжений, $0 < \theta_{ост} \leq 1$.

Разработанный авторами пакет программ KLATRAT включает файлы исходных данных и программные модули, написанные на языке Фортран. Варианты исходных данных и результатов моделирования накапливаются в виде базы данных и используются для анализа, обоснования выводов и закономерностей.

Результаты моделирования: полные и дополнительные смещения, напряжения, деформации, отношение касательных напряжений (1), остаточную прочность угля и пород, изменения модуля деформации в каждом конечном элементе. Учитывая множество расчетных вариантов, особенности моделей и большое количество получаемых по каждому конечному

Таблица 1

Расчетные параметры напряженно-деформированного состояния углеродного массива при взаимном влиянии гравитационных, геотектонических и техногенных напряжений

Вариант модели	Наименование параметра	Точка №1, х=100м, у=-5м*	Точка №2, х=150м, у=-1м	Точка №3, х=200м, у=-1м	Точка №4, х=100м, у=-1м	Точка №5, х=100м, у=100м	Точка №6, х=250м, у=100м	Точка №7, х=100м, у=300м	Точка №8, х=250м, у=300м	Точка №9, х=100м, у=500м	Точка №10, х=250м, у=500м
Однородная изотропная геосреда, с горной выработкой $x_1=50$, $x_2=150$, $\lambda=0,5$, боковая нагрузка по треугольной эпюре с двух сторон блока.	Вертикальные смещения, мм	-119	-732	-424	-419	-828	-782	-1164	-1205	-1317	-1371
	Горизонтальные смещения, мм	0	0	-106	0	0	-174	0	-94	0	-14
	Вертикальные напряжения, МПа	0,5	-8,1	-4,0	-0,2	-2,9	-2,1	-1,3	-1,2	-0,1	-0,3
	Горизонтальные напряжения, МПа	-0,2	-13,8	-7,9	0,1	-3,6	-5,9	-2,6	-2,9	-0,4	-0,5
Однородная изотропная геосреда, с горной выработкой $x_1=50$, $x_2=150$, $\lambda=1,5$, $f=1$, боковая нагрузка по прямоугольной эпюре с двух сторон блока.	Вертикальные смещения, мм	-124	-431	-421	-744	-841	-767	-1178	-1190	-1332	-1352
	Горизонтальные смещения, мм	0	-232	-504	0	0	-848	0	-848	0	-849
	Вертикальные напряжения, МПа	-8,0	-15,6	-12,6	-9,0	-11,9	-11,1	-11,4	-11,3	-11,3	-11,3
	Горизонтальные напряжения, МПа	-0,2	-14,1	-7,9	0,1	-3,6	-5,9	-2,6	-2,9	-0,4	-0,6
Однородная изотропная геосреда, с горной выработкой $x_1=50$, $x_2=150$, $\lambda=0,5$, боковая нагрузка по прямоугольной эпюре с двух сторон блока.	Вертикальные смещения, мм	-123	-432	-421	-746	-843	-768	-1179	-1190	-1332	-1355
	Горизонтальные смещения, мм	0	-13	-131	0	0	-256	0	-255	0	-253
	Вертикальные напряжения, МПа	0,1	-8,8	-4,6	-0,8	-4,0	-3,2	-3,5	-3,3	-3,2	-3,4
	Горизонтальные напряжения, МПа	-0,2	-14,0	-7,9	0	-3,6	-5,9	-2,6	-2,9	-0,4	-0,4

* х, у — координаты характерных точек на модели, рис. 2.

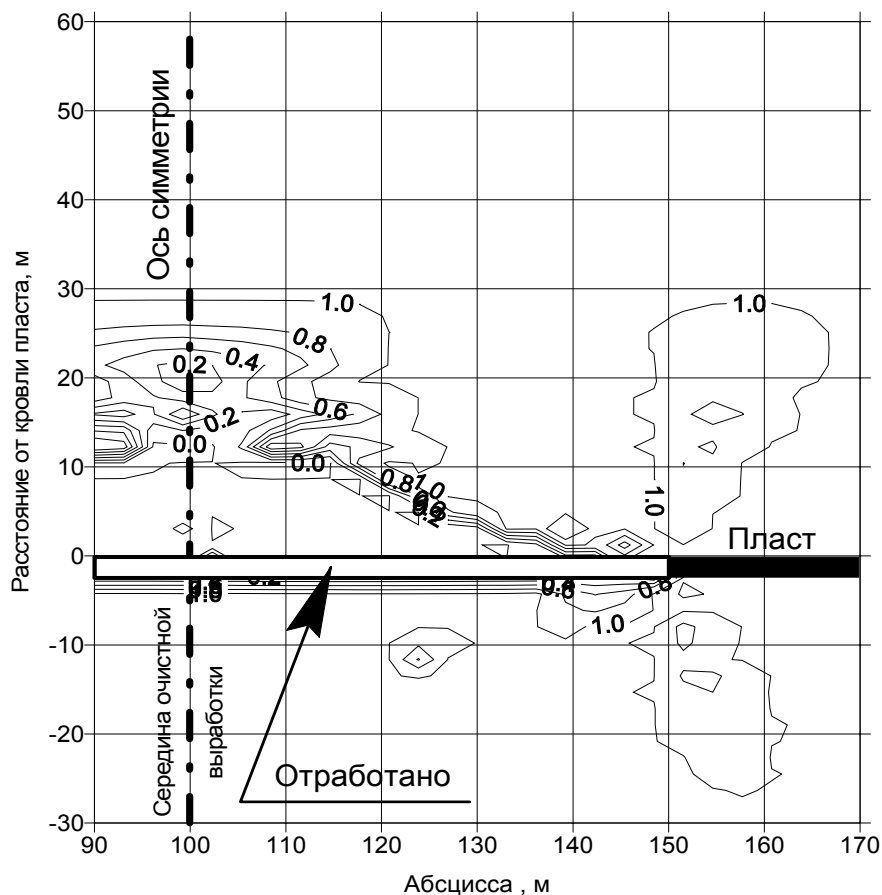


Рис. 3. Изолинии распределения отношения остаточной прочности горных пород к исходной при следующих граничных условиях: снизу модели вертикальные смещения равны нулю, справа и слева приложена боковая нагрузка по треугольной эпюре распределения горизонтальных сил от соседних блоков, сверху модели на земной поверхности нагрузка равна нулю, коэффициент бокового давления $\lambda=0,5$, однородный изотропный массив с включением выработки длиной 100 м

элементу параметров результаты расчетов систематизированы в табл. 1. Для этого на модели (рис. 2) обозначены 10 характерных точек, значения расчетных величин в которых приведены в табл. 1 и используются для анализа характера распределения напряженно-деформированного состояния углепородного массива в разных вариантах. Так как задача решается симметричная относительно оси

абсцисс $X=100$, то на рис. 1 выделены только точки на одной половине модели (справа).

На рис. 3 в качестве примера показано распределение вычисленного по формуле (1) коэффициента остаточной прочности пород. Из графиков следует, что изменения прочности происходят неравномерно. Максимальные разрушения наблюдаются вблизи горных выработок.

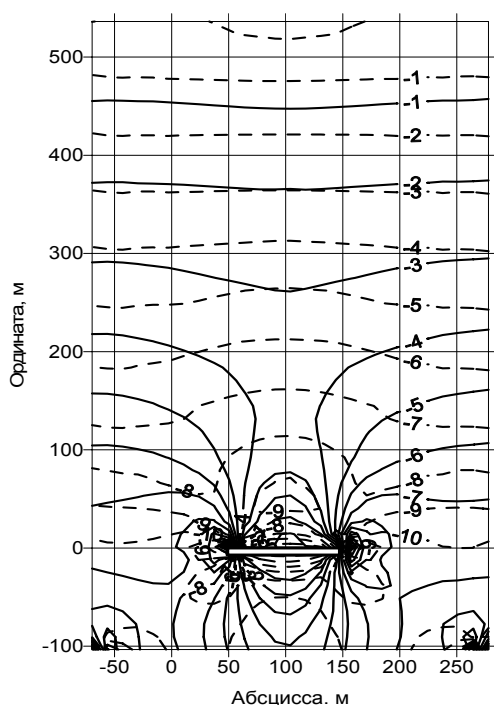


Рис. 4. Изолинии распределения вертикальных (сплошные линии) и горизонтальных (пунктирные линии) напряжений (МПа) при следующих граничных условиях: снизу модели вертикальные смещения равны нулю, справа и слева приложена боковая нагрузка по треугольной эпюре распределения горизонтальных сил от соседних блоков, сверху модели на земной поверхности нагрузка равна нулю, коэффициент бокового давления $\lambda=1,5$, однородный изотропный массив с включением выработки длиной 100 м

После формирования зоны разрушения или повышенной техногенной трещиноватости вновь происходит перераспределение напряжений, то есть расчет геомеханических параметров углепородного массива при совместном влиянии гравитационного, геотектонического и техногенного полей напряжений вновь повторяется с использовани-

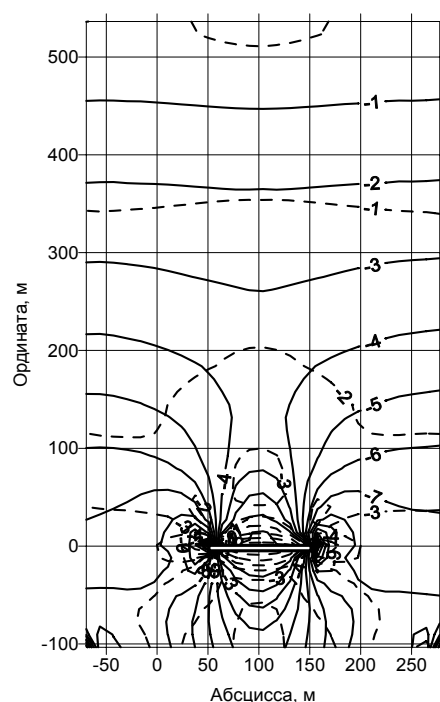


Рис. 5. Изолинии распределения вертикальных (сплошные линии) и горизонтальных (пунктирные линии) напряжений (МПа) при следующих граничных условиях: снизу модели вертикальные смещения равны нулю, справа и слева приложена боковая нагрузка по треугольной эпюре распределения горизонтальных сил от соседних блоков, сверху модели на земной поверхности нагрузка равна нулю, коэффициент бокового давления $\lambda=0,5$, однородный изотропный массив с включением выработки длиной 100 м $\lambda=0,5$

ем новых деформационных характеристик пород.

Особенностью техногенных трещин является, по сравнению с природными, то, что они не заполнены отложениями солей и свободны для миграции флюидов, в том числе метана. Соответственно, граничные условия по берегам техногенных трещин будут иные по сравнению с

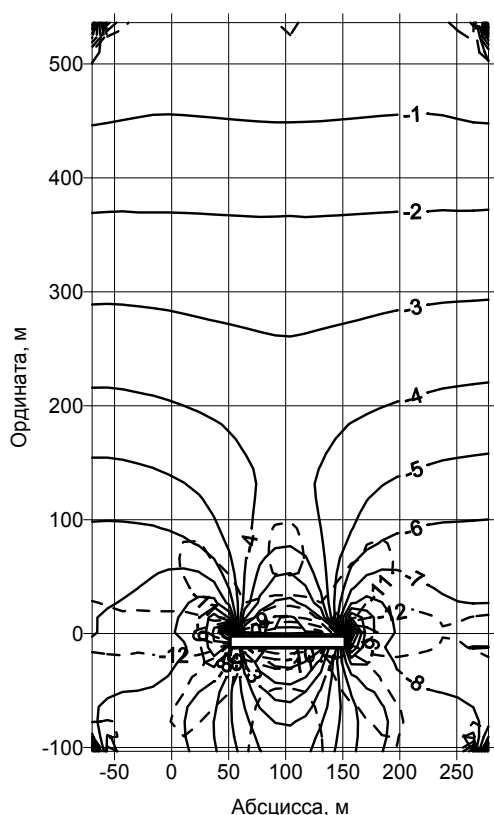


Рис. 6. Изолинии распределения вертикальных (сплошные линии) и горизонтальных (пунктирные линии) напряжений (МПа) при следующих граничных условиях: снизу модели вертикальные смещения равны нулю, справа и слева приложена боковая нагрузка по прямоугольной эпюре распределения горизонтальных сил от соседних блоков, сверху модели на земной поверхности нагрузка равна нулю, коэффициент бокового давления $\lambda=1,5$, однородный изотропный массив с включением выработки длиной 100 м

граничными условиями природными линеаментов.

Влияние трещин учитывается введением в структуру геосреды мягких слоев. Однако свойства материала, за-

полняющего природные и техногенные трещины принимаются разными.

Учет неравномерности распределения природных напряжений и деформаций в блочной среде, включающей горные выработки, осуществляется в соответствии с рис. 1. Для моделирования процессов миграции флюидов в зоне влияния горных выработок зона линеаментов (рис. 2) располагается в краевых участках отрабатываемого угольного пласта. Техногенные трещины могут быть зияющими или заполнены флюидами, в том числе под внутренним давлением.

Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния блочного углепородного массива с учетом влияния горных выработок при разных вариантах систематизированы в табл. 1 и представлены на графиках рис. 4—6.

По результатам моделирования, представленным в таблице 1 и в виде графиков на рис. 4—6, и установлены следующие закономерности распределения вертикальных напряжений в окрестности горной выработки: при увеличении коэффициента бокового давления соседних со стороны структурных блоков в 5 раз вертикальные напряжения в зоне опорного горного давления возрастают в 2 раза независимо от формы эпюры горизонтальных сил со стороны соседних блоков; высота зоны обрушения пород кровли над выработанным пространством достигает 30 % длины выработки и не зависит от величины бокового давления, а вероятность появления заколов и зон разрушения пород кровли впереди выработки снижается при увеличении коэффициента бокового давления от 0,3 до 1,5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Правила* охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. — С-Пб.: ВНИМИ, 1998. — 291 с.

2. *Программа* подготовки данных для проведения расчетов геомеханических параметров угольных шахт методом конечных элементов / В.Н. Фрянов, Ю.А. Степанов // Свидетельство об официальной регистрации программы на ЭВМ №2000610937; Заявка № 2000610798 от 24.06.2000. Зарегистр. 21.09.2000. — М.: Роспатент, 2000.

3. *Программа* расчета геомеханических параметров для исследования взаимодействия секции механизированной крепи с углеродным массивом / А.В. Степанов, В.Н. Фрянов, Ю.А. Степанов // Свидетельство об официальной регистрации программы на ЭВМ № 2001610645; Заявка №2001610402 от 02.04.2001. Зарегистр. 31.05.2001. — М.: Роспатент, 2001.

4. *Правила* охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. — С-Пб.: ВНИМИ, 1998. — 291 с. **ПЛАЭ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Фрянов Виктор Николаевич — доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Разработка пластовых месторождений», E-mail: zzz338@rdtc.ru

Лукин Константин Дмитриевич — кандидат технических наук, профессор,

Петрова Ольга Александровна — аспирант,

Шеховцова Виктория Олеговна — аспирант,

Фрянова Ольга Викторовна — аспирант,

Сибирский государственный индустриальный университет,



РИСУЕТ ДАРЬЯ АБРЕНИНА



Я проходчик, а дочь — борец за мир.