

*С.В. Риб, В.В. Басов*

Сибирский государственный индустриальный университет

**ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
В ОКРЕСТНОСТИ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ**

Одним из методов получения достоверной информации о геомеханических процессах в массиве горных пород при подземной отработке угольных пластов сложного строения являются шахтные эксперименты. Однако их проведение связано с высокими материальными и трудовыми затратами, поэтому в практике научных исследований широко применяется математическое и физическое моделирование [1]. Для изучения напряженно-деформированного состояния массива горных пород широко используются численные методы, а именно, метод конечных элементов [2], реализацию которого осуществляют с помощью комплекса компьютерных программ [3].

В настоящей работе для исследования геомеханических процессов в окрестности подземных горных выработок проводится физическое моделирование процессов деформирования горных пород на моделях из эквивалентных материалов.

Целью настоящей работы является выявление при физическом моделировании закономерностей распределения деформаций в эквивалентном материале в окрестности искусственной полости, воспроизводящей горную выработку на пласте при наличии породного прослойка и без него.

Подбор эквивалентного материала осуществляли для угля, аргиллита, алевролита, алевропесчаника и песчаника [4]. Были рассчитаны прочностные характеристики эквивалентного материала с соблюдением подобия для каждой породы по формулам, предложенным Г.Н. Кузнецовым [1].

Для изготовления эквивалентного материала осуществляли смешивание песка и парафина, процентное содержание материалов смеси по массе составляло 95,0 – 98,5 % и 1,5 – 5,0 % соответственно. Было изготовлено по пять образцов из смеси песка и парафина каждого варианта сочетания их масс. Испытание образцов на одноосное сжатие осуществляли на гидравлическом прессе «Азимут» БП-29.

По результатам испытаний определены предел прочности образцов при одноосном сжатии ( $\sigma_{сж}$ ).

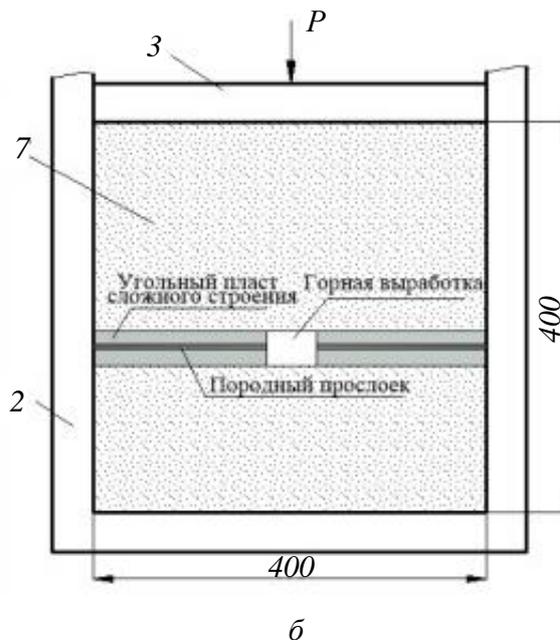
В соответствии с результатами расчета по методике работы [1] и данных проведенных испытаний подобрана рецептура состава смеси и определены пределы прочности эквивалентного материала при сжатии, соответствующие реальным горным породам.

Для определения параметров напряженно-деформированного состояния горных пород в окрестности горной выработки на пластах сложного строения был разработан и изготовлен лабораторный стенд [5]. Общий вид лабораторного стенда и схема расположения горной выработки в модели из эквивалентных материалов показаны на рис. 1. Лабораторный стенд включает в себя корпус, гидравлическое и контрольно-измерительное оборудование. Корпус состоит из боковых стенок, основания, подвижной плиты для размещения гидродомкрата, на котором установлен динамометр, упирающийся в перекладину. В состав контрольно-измерительного оборудования входит динамометр с индикатором часового типа, прошедший метрологическую поверку; фотоаппарат с приспособлениями (штатив, система освещения), компьютер. Пространство стенда для укладки песчано-парафиновой модели имело следующие размеры: ширина 400 мм, высота 400 мм, глубина 100 мм. На физических моделях воспроизводится область горного массива, равная трем радиусам ширины выработки (масштаб 1:100) при соблюдении механического и геометрического подобия.

Моделировали слоистый массив горных пород, вмещающий угольный пласт сложного строения одной из шахт Кузбасса в масштабе 1:100. На модели из эквивалентных материалов воспроизводили область горного массива 40×40 м с угольным пластом и вмещающими его горными породами. В ходе экспериментов сравнивали качественную картину развития процесса деформирования пород в окрестности одиночной выработки для пласта простого



*a*



*б*

Рис. 1. Лабораторный стенд для определения параметров напряженно-деформированного состояния массива горных пород в окрестности горной выработки (*a*) и схема расположения горной выработки в модели из эквивалентных материалов (*б*):

- 1 – пространство для укладки песчано-парафиновой модели; 2 – корпус стенда; 3 – подвижная плита; 4 – гидравлический домкрат; 5 – динамометр с индикатором часового типа; 6 – основание стенда; 7 – песчано-парафиновая модель;  $P$  – прилагаемая нагрузка

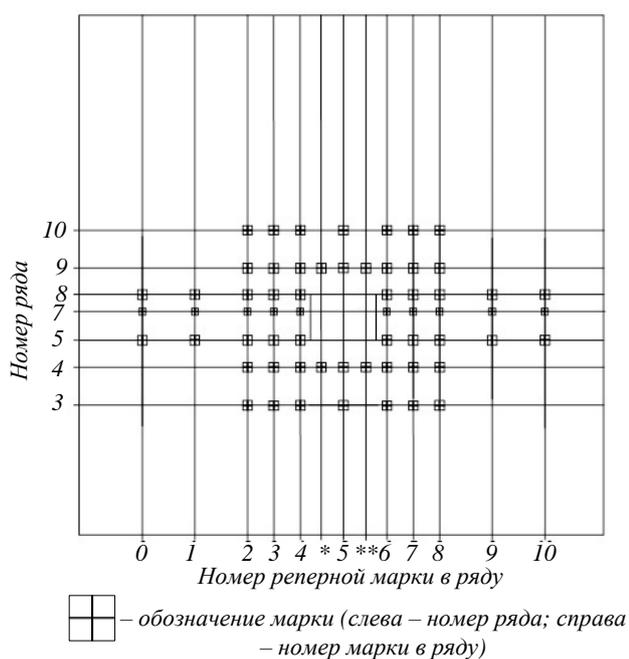


Рис. 2. Схема расположения реперных марок на лицевой стороне физической модели

строения (без породного прослойка) и при наличии в пласте породного прослойка.

Нагрузку задавали ступенчато. Возникающие при этом деформации массива фиксировали зеркальной цифровой фотокамерой с захватом области 480×480 мм, которую устанавливали в одном положении на время всего лабораторного эксперимента (разрешение фотокамеры 20,4 Мп).

Изготовление модели происходило путем закатки слоев снизу вверх. При этом для каждого слоя использовали эквивалентный материал, соответствующий прочностным и деформационным характеристикам породы в натуре. Готовую смесь в горячем состоянии перекладывали в опалубку лабораторного стенда. Грабли и гладилки перед укаткой обеспечивали равномерное разрыхление смеси и выравнивание поверхности

слоя. Уплотнение каждого слоя осуществляли цилиндрическим катком. В центре модели сооружали выработку, высота и ширина которой в пересчете на натуру составляли 3,6 и 5,0 м соответственно.

Измерение смещений поверхности модели проводили по реперным маркам (рис. 2), которые закрепляли на лицевой поверхности модели (семь рядов марок) в окрестности горной выработки (в почве, боках и кровле). Расстояния между марками, приведенные к условиям натуры, по вертикали и по горизонтали составляли от 1 до 4 м. На корпус используемого стенда наклеивали опорные реперные марки, которые остаются неподвижными в процессе испытания. Посредством опорных реперных марок фиксировали оседание всей модели и конвергенцию на участках между марками в горизонтальном и вертикальном направлениях. После установки всех марок на лицевую и тыльную части модели прикручиваются на шпильки прозрачные оргстекла толщиной 10 мм.

В ходе лабораторных экспериментов сравнивали качественную картину изменения дефор-

маций массива в окрестности одиночной выработки:

- модель 1 – для пласта однородного строения (при отсутствии породного прослойка);
- модель 2 – при наличии породного прослойка в пласте.

Общий вид моделей в начале испытаний приведен на рис. 3.

Качественную картину поведения массива изучали на основании анализа смещений фиксированного расположения реперных марок всех уровней на фотоснимках.

Координаты реперных марок определяли методом фотофиксации. Проводили фотографирование модели до начала испытаний, а затем последовательно при каждом цикле нагружения. Положение фотокамеры неизменно для того, чтобы на снимке были расположены опорные реперные марки на корпусе стенда. После проведения испытаний проводили обработку результатов с помощью компьютерной программы AutoCAD.

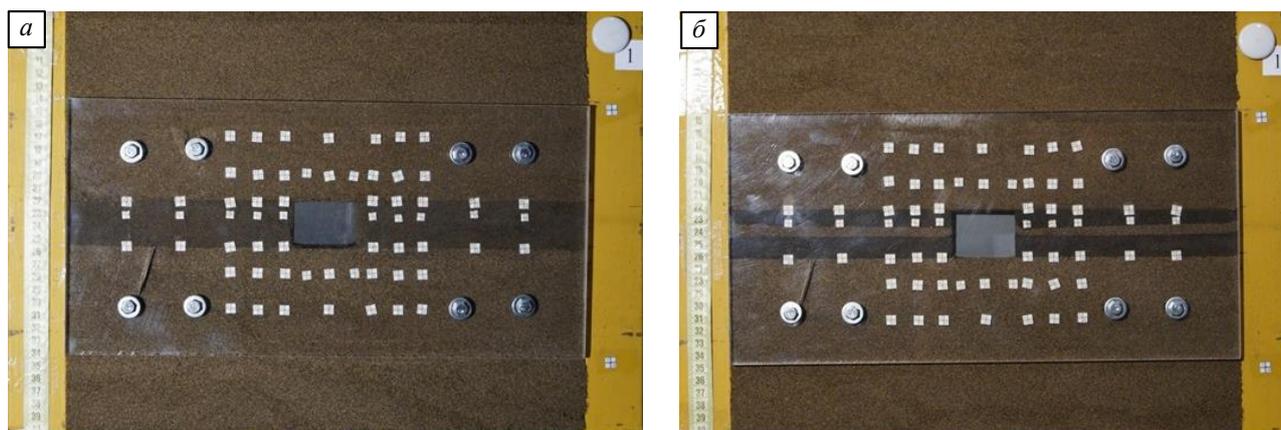


Рис. 3. Начало нагружения моделей 1 (а) и 2 (б)

По результатам исследования (табл. 1, 2) построены зависимости изменения вертикальных смещений кровли и почвы выработки от величины нагружения (рис. 4 – 7).

Установлено, что наличие породного прослойка с прочностью в три раза большей по сравнению с углем приводит к уменьшению смещений пород почвы в выработке на 30 %, а кровли – на 60 %.

**Выводы.** По результатам обработки фотоснимков установлено, что конструкция стенда, разработанная и реализованная методика физического моделирования позволяют выявлять закономерности распределения смещений при разных вариантах моделей, в том числе при однородном пласте и с включением в него по-

родного прослойка. Можно отметить следующее: при моделировании процессов деформирования пород в окрестности выработки с породным прослойком величины вертикальных смещений уменьшились по отношению к величине смещений, полученных при моделировании выработки без прослойка.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование проявлений горного давления / Г.Н. Кузнецов, М.Н. Будько, Ю.И. Васильев и др. – Л.: Недра, 1968. – 279 с.
2. Риб С.В., Домрачев А.Н. Разработка алгоритма оценивания напряженно-деформированного состояния неоднородного угольного

целика с использованием двух- и трехмерной реализации метода конечных элементов. – В кн.: Системы автоматизации в образовании, науке и производстве. Труды X Всероссий-

ской научно-практической конференции. / Под общ. ред. С.М. Кулакова, Л.П. Мышляева. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2015. С. 465 – 469.

Т а б л и ц а 1

**Величины смещений в рядах кровли выработки (9) и почв выработки (4) при максимальном нагружении**

Ряд	Смещения марок, мм, после максимального нагружения, при номере марки								
	9-2	9-3	9-4	9-*	9-5	9-**	9-6	9-7	9-8
Ряд 9	7,38	9,31	10,64	11,13	11,12	10,96	10,80	9,60	8,20
	2,44	3,90	5,00	5,45	5,51	5,30	4,96	3,87	3,05
Ряд 4	4-2	4-3	4-4	4-*	4-5	4-**	4-6	4-7	4-8
	5,07	3,65	2,41	2,08	2,20	2,25	2,67	3,97	4,61
	2,09	1,51	0,87	0,79	0,69	0,91	1,05	1,70	2,08

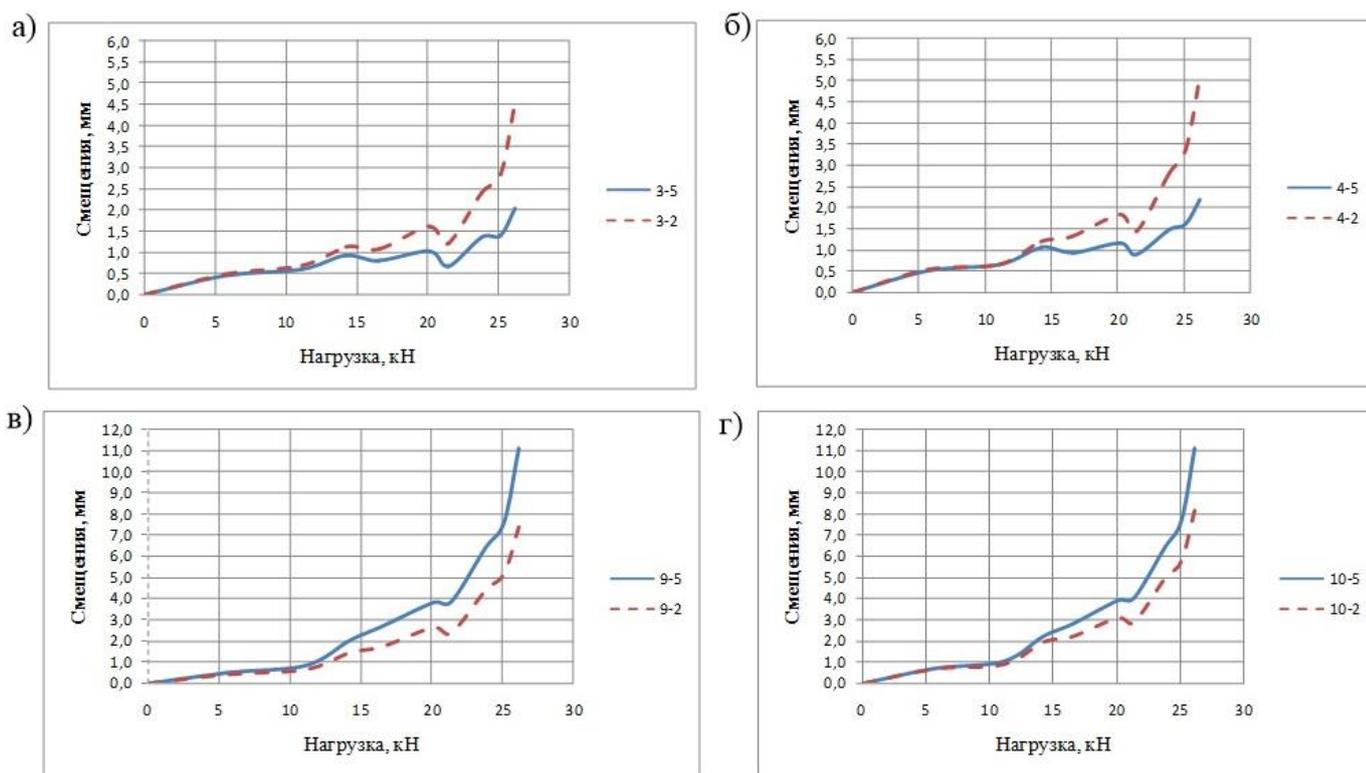


Рис. 4. Изменение вертикальных смещений от величины нагружения по маркам 2 и 5 в рядах 3, 4, 9, 10 (модель 1)

## Результаты обработки фотоснимков

Модель	Ряд	Марка	Смещения марок, мм, при нагружении, кН									
			0	5,69	11,14	14,24	16,54	20,1	21,39	23,08	25,12	26,16
1	3	3-2	0	0,49	0,69	1,12	1,07	1,61	1,20	2,40	2,85	4,55
		3-5	0	0,45	0,61	0,92	0,80	1,03	0,67	1,36	1,40	2,05
	4	4-2	0	0,55	0,67	1,19	1,32	1,83	1,45	2,80	3,35	5,07
		4-5	0	0,52	0,67	1,06	0,93	1,16	0,89	1,48	1,61	2,20
	9	9-2	0	0,43	0,66	1,45	1,74	2,64	2,38	4,38	5,19	7,38
		9-5	0	0,52	0,85	2,04	2,71	3,82	3,86	6,4	7,61	11,12
	10	10-2	0	0,69	0,91	1,96	2,22	3,11	2,9	4,96	5,8	8,19
		10-5	0	0,71	1,05	2,23	2,81	3,92	4,04	6,41	7,68	11,11
2	3	3-2	0	0,32	0,03	0,57	0,85	1,15	1,04	1,28	1,53	1,91
		3-5	0	0,34	0,15	0,52	0,59	0,73	0,57	0,59	0,76	0,87
	4	4-2	0	0,36	0,03	0,63	0,87	1,21	1,08	1,30	1,56	2,09
		4-5	0	0,33	0,07	0,52	0,51	0,63	0,50	0,48	0,65	0,69
	9	9-2	0	0,38	0,02	0,67	0,99	1,51	1,39	1,68	1,9	2,44
		9-5	0	0,32	0,15	1,2	1,84	2,84	3,03	3,83	4,32	5,51
	10	10-2	0	0,4	0,2	0,89	1,31	1,86	1,92	2,27	2,49	3,03
		10-5	0	0,36	0,26	1,24	1,81	2,69	2,9	3,69	4,19	5,29

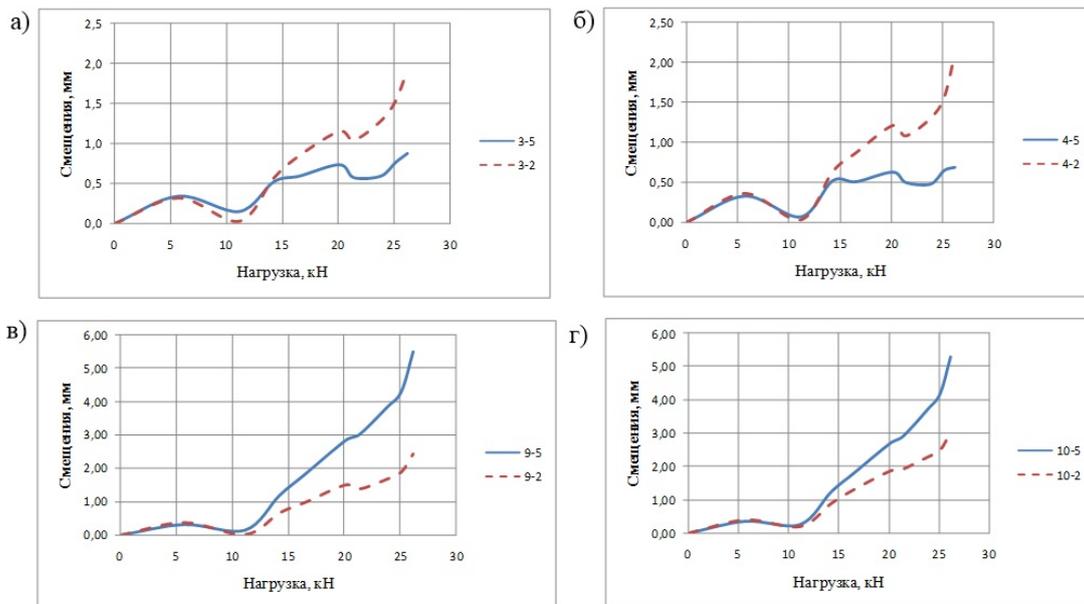


Рис. 5. Изменение вертикальных смещений в зависимости от величины нагружения по маркам 2 и 5 в рядах 3, 4, 9, 10 (модель 2)

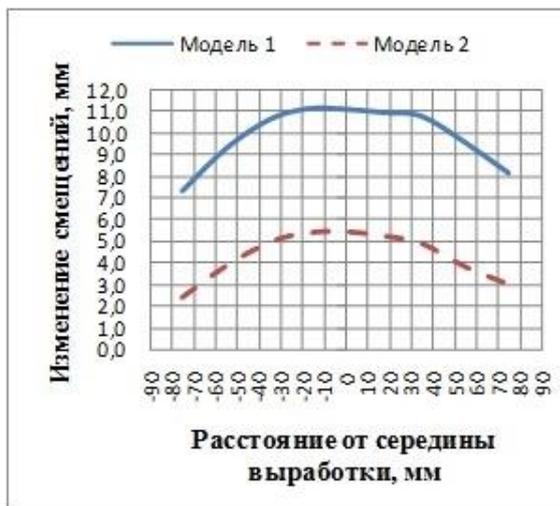


Рис. 6. Зависимости изменения смещений марок в ряду 9 кровли выработки:  
 — модель 1; - - - - - модель 2



Рис. 7. Зависимости изменения смещений марок в ряду 4 почвы выработки:  
 — модель 1; - - - - - модель 2

3. Свидетельство о регистрации электронного ресурса. «Комплекс программ для прогноза геомеханических и технологических параметров подземных горных выработок и неоднородных угольных целиков с тестированием численной модели по результатам точечного мониторинга» / С.В. Риб, Д.М. Борзых, В.Н. Фрянов. Гос. акад. наук, ИНИПИ РАО, 2014. № 20629. Дата регистрации 09.12.2014.
4. Басов В.В., Риб С.В. Подбор эквивалентного материала для физического моделирования геомеханических процессов в окрестности подготовительных выработок угольных

- шахт // Вестник СибГИУ. 2016. № 4 (18). С. 32 – 35.
5. Риб С.В. Лабораторный стенд для определения деформаций горных пород в окрестности выработки на пластах сложного строения. – В кн.: Научно-технические разработки и использования минеральных ресурсов. Вып. 3. / Под общ. ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2017. С. 155 – 157.

© 2017 г. С.В. Риб, В.В. Басов  
 Поступила 16 ноября 2017 г.