

РАЗРАБОТКА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ

УДК 621.721: 778.38: 620.10

Рахимов З.Р., Барулин А.И.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА НА ТОЧНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТКОСОВ

Для изучения процессов, происходящих в массиве, подсеченном горной выработкой, часто применяется метод моделирования. В моделировании проявлений горного давления используются три вида стендов: объемный, плоский и лоток. Независимо от выбранного для моделирования типа стенда особое внимание необходимо уделять собственной жесткости его конструкции. Недостаточная жесткость конструкции стенда может не только влиять на точность измерения деформаций, но и оказывать негативное влияние на изучаемый исследователем процесс или явление. Еще до начала разработки проекта моделирования или создания стенда индивидуального назначения следует решить целый ряд вопросов, таких как: жесткость стенда, прочность основания, на котором планируется его разместить, противодействие факторам, которые могут оказывать существенное негативное влияние (колебания каркаса здания, перепады температур), и т. д.

Указанный перечень проблем решается в связи с созданием стенда для моделирования откосов. Показанная на **рис. 1** рамная конструкция для моделирования открытых горных выработок изготовлена в условиях мастерских Рудненского индустриального института из разборных компонентов для удобства транспортирования в лабораторию. Боковые стойки и основание каркаса модели изготавливаются из швеллера № 16 П (сталь 3). Для придания устойчивости и дополнительной жесткости методом ручной дуговой сварки к нижним частям боковых стоек присоединяются поперечные упоры из уголкового профиля, а к основанию каркаса – крепежные площадки. Конструкция собирается в помещении лаборатории при помощи болтовых соединений М10×60, через три отверстия, обеспечивающие плоский надежный контакт соединяемых частей конструкции. Для решения специфических задач исследования влияния внешних факторов на устойчивость открытых горных выработок каркас

может дополняться механизмом задания внешнего давления, который также существенно повышает жесткость каркаса стенда. С целью улучшения условий изготовления модели массива горных пород механизм имитации внешнего давления может удаляться.

К основным нагрузкам, которым должен противостоять каркас исследовательского стенда, относятся: вес материала, из которого изготавливается массив модели и внешняя нагрузка, имитирующая давление машин или внешних отвалов. Модель изготавливается в ограниченном объеме каркаса и боковых опалубок, представляющих собой отрезки швеллера № 16, прикрепляемые к каркасу болтами М8×30 на период формирования массива модели. Материал моделирования закладывается в ограниченный опалубкой объем небольшими слоями 0,05–0,1 м. Для придания устойчивой плотности материалу моделирования слой уплотняется 20-кратным прокатыванием 10-килограммового ролика по наложенной сверху полосе линолеума. Чтобы исключить обрушение модели после снятия опалубки, между слоями в шахматном порядке укладываются тяжи компенсации бокового распора материала моделирования. Тяжи представляют собою парные кольца, изготовленные из листового материала, навинченные на концы резьбовой шпильки.

Разработанная конструкция стенда для испытания плоских моделей позволяет формировать модели откосов из эквивалентных или физически подобных материалов и проводить исследования на деформируемость при искусственном нагружении посредством конструкции рычажной системы, а также без нагрузки.

Одна боковина каркаса надежно крепится к бетонному фундаменту двумя закладными болтами, а вторая оставлена свободно опертой. Такая фиксация стенда обеспечивает свободное изменение длины основания каркаса при изменении температуры в помещении лаборатории.

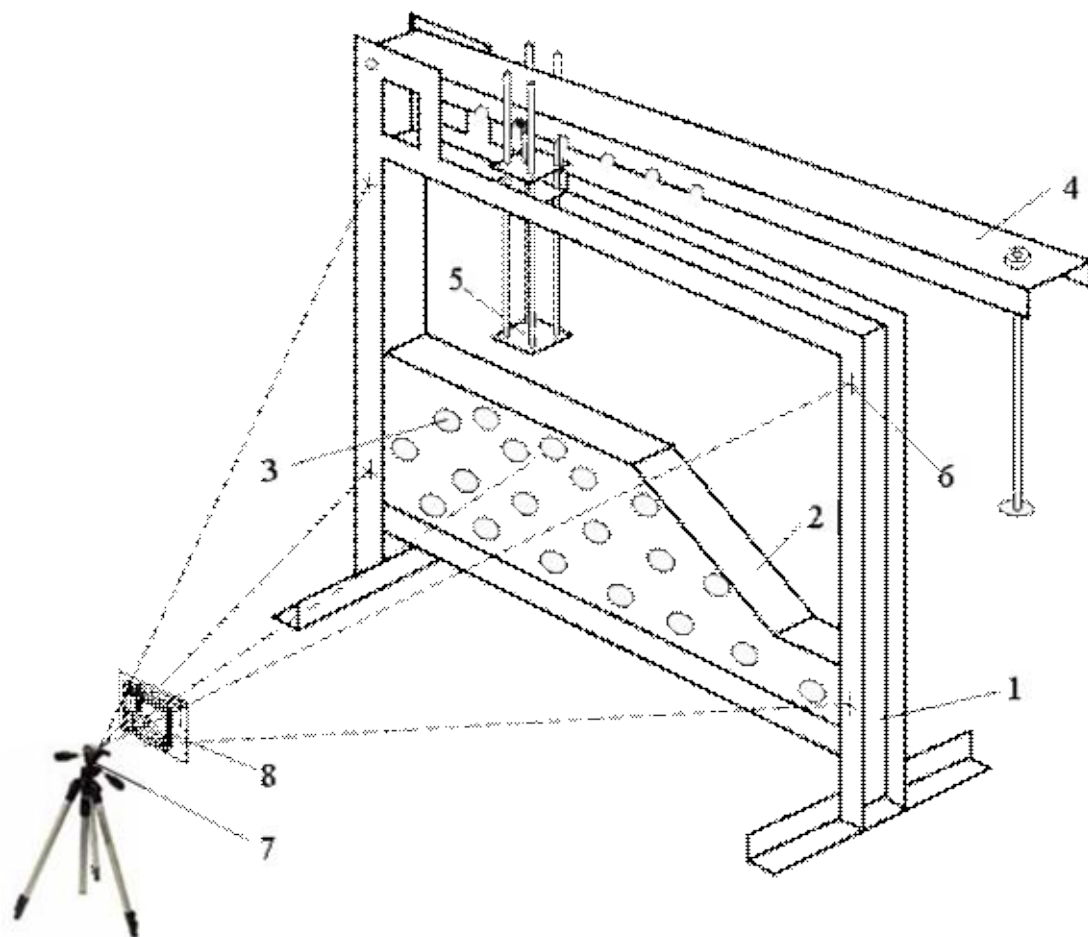


Рис. 1. Общий вид стенда для моделирования:
 1 – несущий каркас; 2 – откос из эквивалентного материала или породы; 3 – тяжести компенсации бокового распора материала моделирования; 4 – механизм внешнего давления; 5 – площадка имитации давления внешнего отвала; 6 – опорные марки; 7 – фотоаппарат на штативе; 8 – снимок модели

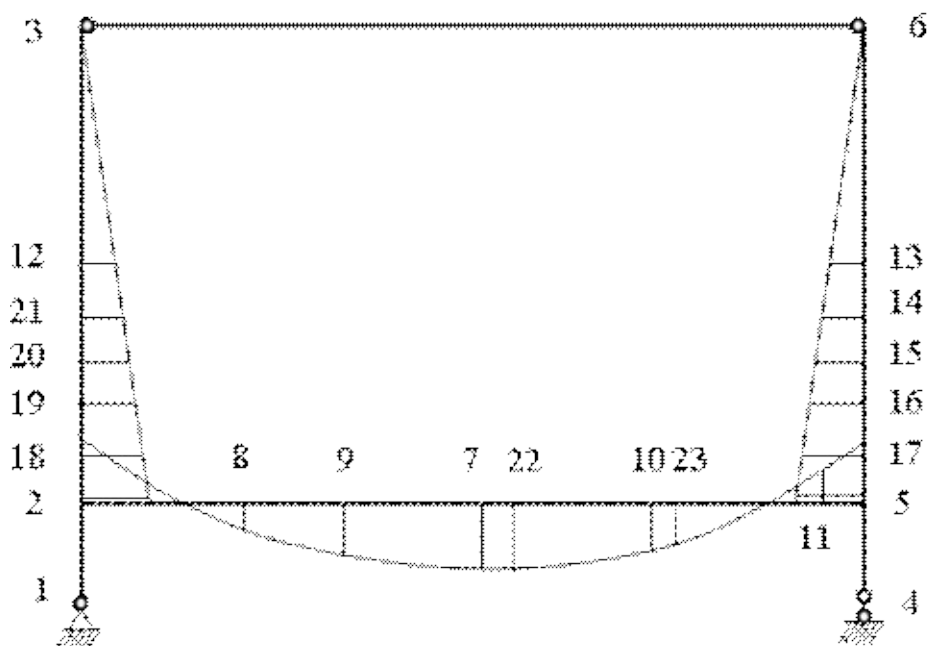


Рис. 2. Эпюра моментов стенда, нагруженного моделью нетронутого массива

Расчет на жесткость стенда для моделирования проведен как для рамной конструкции в виде балки с одной шарнирно-закрепленной и одной шарнирно-незакрепленной опорами и ригелем, выполняющим функцию затяжки. Расчет осуществлен методом конечных элементов с использованием программы Лира 9.0 [1]. Проверка точности расчетов для некоторых точек стенда осуществлена, используя метод сил на основе формулы

$$\delta_k = \int \frac{M_k \cdot M}{E \cdot J} dS,$$

где M_k – эпюра моментов в заданной системе от единичной силы; M – эпюра моментов от заданной расчетной нагрузки; E – модуль упругости первого рода; J – момент инерции элемента стенда.

Окончательная эпюра моментов для полного нагружения стенда, характерного для нетронутого состояния массива горных пород, представлена на **рис. 2**.

На **рис. 2** максимальный момент составляет 110 Н·м в точке 7, а минимальный – минус 87 Н·м в точках 2 и 5. Прогиб данной рамной конструкции в вертикальном направлении изменяется от 0 в узловой точке 1 до минус 0,094 мм в точке 7. В горизонтальном направлении прогиб изменяется от 0 в точке 1 до 0,075 мм в узловых точках 12 и 21.

При формировании откосной части из модели шпателем удаляется определенное количество материала, что приводит к уменьшению прогиба его элементов. В **табл. 1** представлены результаты расчетов вертикального, а в **табл. 2** – горизонтального прогибов стенда при формировании различных моделей откоса.

Из данных, приведенных в **табл. 1** и **2**, видно, что смещения каркаса стенда, рассчитанные в

миллиметрах, незначительны. Так, в точке 7 максимальная разность вертикальных смещений составляет 0,011 мм, а в точках 4 и 13 максимальная разность горизонтальных смещений достигает 0,009 и 0,007 мм соответственно. Хотя наибольшее влияние на деформированное состояние стенда относится к состоянию модели нетронутого массива, при создании откоса уровень перемещений уменьшается незначительно.

Так как представленный стенд разработан также и для моделирования нагруженных откосов, то описанным выше способом был выполнен анализ его напряженно-деформированного состояния при условии действия на откос равномерно распределенной по длине нагрузки. Такая задача достаточно часто встречается при оценке влияния на напряженно-деформированное состояние откоса и его устойчивость машин и агрегатов большой единичной мощности (например, драглайнов) или внешних отвалов.

Влияние равномерно распределенной нагрузки на деформирование каркаса стенда исследуется для различных значений высот и углов наклона откосов. Изучается также влияние величины нагрузки (q), длины приложения (l) и ее удаленности от верхней бровки откоса. На **рис. 3** пред-

Таблица 2

Горизонтальные смещения каркаса стенда (мм) при моделировании откосов

Номер узла	Состояние нетронутого массива	Параметры откоса в массиве глинистых пород			
		H=0,25 м, α=30°	H=0,25 м, α=45°	H=0,15 м, α=60°	H=0,15 м, α=20°
1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
2	0,038	0,036	0,038	0,038	0,038
3	0,039	0,048	0,043	0,042	0,041
4	0,077	0,068	0,074	0,074	0,075
5	0,039	0,036	0,038	0,038	0,038
6	0,038	0,048	0,042	0,042	0,041
7	0,039	0,036	0,038	0,038	0,038
8	0,038	0,036	0,038	0,038	0,038
9–11	0,039	0,036	0,038	0,038	0,038
12	0,075	0,074	0,075	0,075	0,074
13	0,003	0,010	0,006	0,005	0,005
14	0,002	0,008	0,004	0,004	0,004
15	0,004	0,010	0,006	0,006	0,006
16	0,011	0,014	0,012	0,012	0,012
17	0,022	0,023	0,023	0,023	0,023
18	0,055	0,052	0,054	0,054	0,054
19	0,066	0,063	0,066	0,065	0,065
20	0,073	0,070	0,072	0,072	0,072
21	0,075	0,073	0,075	0,075	0,075
22, 23	0,039	0,036	0,038	0,038	0,038

Таблица 1

Вертикальные смещения каркаса стенда (мм) при моделировании откосов

Номер узла	Состояние нетронутого массива	Параметры откоса в массиве глинистых пород			
		H=0,25 м, α=30°	H=0,25 м, α=45°	H=0,15 м, α=60°	H=0,15 м, α=20°
1–6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	-0,094	-0,083	-0,091	-0,091	-0,091
8	-0,045	-0,041	-0,044	-0,044	-0,044
9	-0,082	-0,074	-0,080	-0,080	-0,080
10	-0,079	-0,068	-0,076	-0,076	-0,076
11	-0,011	-0,009	-0,010	-0,010	-0,010
12–21	-0,000	-0,000	-0,000	-0,000	-0,000
22	-0,092	-0,081	-0,090	-0,081	-0,090
23	-0,066	-0,056	-0,063	-0,056	-0,063

ставлено деформированное состояние каркаса модели от влияния откоса высотой 0,25 м с углом наклона 30° (а) и того же откоса, нагруженного равномерно распределенной на длине $l = 0,16$ м нагрузки $q = 2000$ Н (б). Из рисунка следует, что независимо от типа нагружения каркас стенда претерпевает сходное деформирование, заключающееся в прогибе боковых стоек внутрь и основания вниз. Качественно различим только практически равномерный прогиб основания каркаса стенда при воздействии на него материала моделирования откоса, а при внешнем нагружении откоса точка максимального прогиба смещается в сторону оси этой нагрузки. Прогиб становится неравномерным.

Большое различие отмечается только при количественном анализе изменения значений смещений и действующих на рамную конструкцию поперечных моментов M_y . Величина абсолютного перемещения наиболее деформированной части основания модели откоса составляет минус 0,09 мм, тогда как при внешнем нагружении она возрастает до значения минус 0,28 мм. Так же, приблизительно в 3 раза, возрастает и величина горизонтального прогиба боковин каркаса, с 0,07 до 0,26 мм. Отношение действующих в рамной конструкции поперечных моментов достигает четырех.

Другим фактором, оказывающим влияние на деформации стенда, является температурное расширение, которое определяется для стоек и балки по формуле

$$\Delta L = \Delta t \cdot \alpha \cdot L,$$

где Δt – максимальное изменение температуры, $\Delta t = 2^\circ\text{C}$; α – температурное расширение стали Ст3, $\alpha = 1,2 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; L – длина стоек 1200 и балки 1160 мм, изготовленных из стали Ст3.

Для стоек температурное расширение и изменение их длин составляет 0,0216 мм, для балки – 0,0209 мм. Деформации, вызванные температурными перепадами, в 2–3 раза меньше максимальных деформаций от нагружения стенда глинистым материалом.

Суммарная максимальная величина погрешности определения смещений m в плоскости наблюдений рассчитывается по формуле

$$m = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta M^2},$$

где ΔL – максимальное абсолютное температурное смещение каркаса; ΔM – максимальное абсолютное смещение узловой точки каркаса от веса материала моделирования и внешней нагрузки.

Таким образом, при моделировании ненагруженных откосов максимальная погрешность определения смещений составляет 0,078 мм, а для откосов при условии максимально возможной, по конструктивным соображениям, внешней нагрузке – 0,38 мм. Следовательно, недостаточно обоснованными выглядят результаты, полученные на моделях с большими габаритными размерами при использовании оптических тензодатчиков, обеспечивающих погрешность отсчитывания в 0,01 мм [2].

В выполненном моделировании нагруженного внешнего откоса для исследования его механизма деформирования и очертаний наиболее напряженной поверхности скольжения [3] используется метод фотограмметрии. Перемещения участков откоса находятся по разности

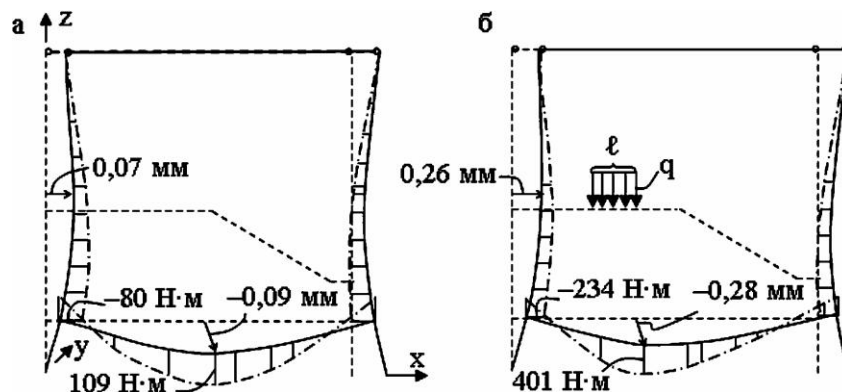


Рис. 3. Деформированное состояние каркаса стенда от действия ненагруженного и нагруженного откосов, совмещенное с эпюрой осевых моментов M_y

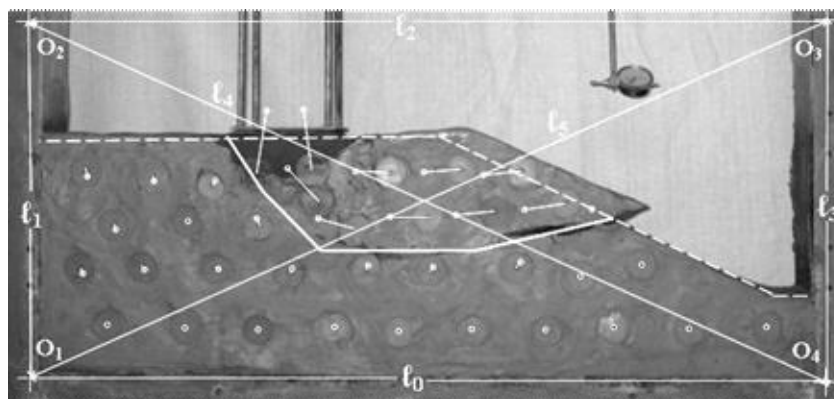


Рис. 4. Определение деформирования каркаса модели при обработке снимков

Таблица 3

Оперативный контроль жесткости каркаса стенда для модели № 34

Этап моделирования (i)	Геометрические элементы контроля жесткости рамы, мм							
	l_0	l_0/l_0^0	l_2	l_2/l_2^0	$l_{1,3}$	$l_{1,3}/l_{1,3}^0$	l_6	l_6/l_6^0
Ненагруженный каркас (l_6^0 – базовое значение)	1199,00	1,000	1198,00	1,000	532,10	1,000	1035,10	1,00000
С моделью массива	1199,00	1,000	1198,00	1,000	532,10	1,000	1035,27	0,99984
С моделью откоса	1199,00	1,000	1198,00	1,000	532,10	1,000	1035,26	0,99985
С нагруженным откосом	1199,00	1,000	1198,00	1,000	532,10	1,000	1035,43	0,99968

смещений центров тяжей, полученных с фотоснимков в разные периоды наблюдений: в нетронутом массиве, после создания откоса и каждого шага внешнего нагружения. Один из конечных фотоснимков деформированной модели откоса представлен на **рис. 4**.

Необходимы минимальные затраты для оперативного контроля жесткости конструкции стенда в процессе моделирования откосов, сопряженные с проверкой постоянства основных геометрических элементов рамы. К основным геометрическим элементам относятся расстояния между опорными фотограмметрическими марками, закрепленными на каркасе (O_1, O_2, O_3, O_4). При фотограмметрическом измерении деформаций они используются для вычисления коэффициентов продольного и поперечного подобия, а также для взаимного ориентирования снимков. Отклонение отношений одноименных линейных значений (l_0, l_1, \dots, l_6), измеренных по снимкам, позволяет выполнять оценку жесткости конструкции от снимка к снимку. Вертикальное расстояние по середине рамной конструкции (l_6) не показано вследствие удаления верхней, не информативной части фотоснимка. Результаты контроля жесткости рамной конструкции для представленной на **рис. 4** модели откоса приведены в **табл. 3**. Анализ этих результатов свидетельствует об удовлетворительном соответствии рассчитанных методом конечных элементов и измеренных по снимкам значений перемещений рамной конструкции.

Так, например, невозможно четко зафиксировать изменение длины элементов геометрического контроля исходного прямоугольника (l_0, l_1, l_2 и l_3), объясняемого тем, что прогибы стоек и основания рамного каркаса модели симметричны, одинаковы и незначительны по абсолютной величине. Однако общая высота рамного просвета l_6 изменяется на величину, которую можно измерить, и она увеличивается для модели нетронутого массива, незначительно уменьшается при выемке части материала для формирования откоса и вновь увеличивается при имитации давления внешнего отвала. Если предположить, что максимальные абсолютные значения деформаций каркаса модели в наиболее интересующей исследователя зоне суммируются, то эта величина и является непрогнозируемой погрешностью измерений. Следовательно, точность определения смещений точек модели должна быть на порядок ниже.

В связи с выполненными исследованиями жесткости каркаса стенда при обработке цифровых фотоснимков не следует стремиться к получению перемещений с максимально возможной точностью. В связи с этим, при помощи программного продукта Adobe Photoshop 7.0 на компьютере измерения должны быть ограничены разумной точностью в 1 мм. В том случае, если обработке подвергаются результаты исследований деформирования ненагруженных откосов, тогда точность может быть повышена на порядок.

Библиографический список

1. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. Лира версия 9.0. Руководство пользователя. Кн. 3. Примеры расчета и построения / Под ред. А.С. Городецкого. Киев: Изд-во НИИАСС, 2002. 99 с.
2. Моделирование проявлений горного давления / Кузнецов Г.Н., Будько М.Н., Васильев Ю.И., Шклярский М.Ф., Юревич Г.Г. / Под ред. Г.Н. Кузнецова. Л.: Недра, 1968. 280 с.
3. Рахимов З. Р., Барулин А. И. Моделирование откосов методом физического подобия // Материалы 65-й науч.-техн. конференции: Сб. докл. Т. 1. Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ», 2007. С. 156–158.