

УДК 658.32:622.33

В.А. Бабелло

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НАСЫПНЫХ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД

Приведены результаты экспериментального исследования напряженного состояния насыпных массивов горных пород в стендовых и натуральных условиях. Описана методика оценки погрешностей применяемых приборов в связи с изменением напряженного состояния массивов. Проведено сравнение результатов определения напряжений, полученных опытным путем и по модели нелинейно-деформируемой среды.

Ключевые слова: мессдоза, напряжения в породном массиве, насыпные массивы горных пород.

V.A. Babello THE EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE STRESSED STATE OF THE BULK ROCK MASS

The outcomes of an experimental research of a state of stress of bulk rock masses in bench and full-scale conditions are adduced. The technique of an estimation of errors of used devices is described in connection with change of a state of stress of massifs. Matching outcomes of definition of pressure (voltage, stresses) obtained by practical consideration and on model non-linear - of deformed environment is conducted.

Key words: pressure cell, rock mass stress, bulk rock mass.

Результаты прямых измерений распределения напряжений в породном массиве заслуживают доверия лишь при использовании измерительных приборов – мессдоз с заранее известной и учитываемой экспериментатором ошибкой измерения [1]. Измерение напряжений в породной среде связано с необходимостью преодоления многочисленных трудностей, обусловленных сложными и изменяющимися свойствами нескальных пород. Опытами отечественных и

зарубежных исследователей установлено, что:

– с увеличением отношения высоты корпуса измерительного прибора (датчика, мессдозы) к его диаметру погрешность показаний мессдозы существенно увеличивается;

– погрешность показаний мессдозы увеличивается при увеличении отношения деформационных характеристик мессдозы и окружающего грунта;

– погрешность показаний мессдозы возрастает при увеличении прогиба ее корпуса.

В экспериментальных исследованиях, выполненных нами, применялись мессдозы двух типов, сконструированные и выполненные с учетом специфики измерения возрастающих напряжений в стендовых и натуральных условиях при квазистатическом характере приложения нагрузки. Первый тип мессдозы представляет собой мембранный датчик цилиндрической формы, диаметром $3,5 \cdot 10^{-2}$ м и высотой $0,5 \cdot 10^{-2}$ м с параллельным перемещением мембран. Для изучения поведения такой мессдозы в условиях сложного напряженного состояния нами был изготовлен прибор трехос-

ного сжатия образца породы с возможностью независимого регулирования каждого из трех главных напряжений и создания условий близких к тем, которые возникают при измерении напряжения в породном массиве (формирование области концентрации напряжения вокруг мессдозы).

В опытах использовался среднезернистый песок с плотностью $\rho = 1,8 \text{ т/м}^3$ (максимально уплотненный) и $\rho = 1,57 \text{ т/м}^3$ (рыхлый). Эти же значения характеризовали плотность сложения песчаного массива в стендовых условиях.

Испытания породных образцов, находящихся в сложном напряженном состоянии, позволили установить, что применявшиеся нами мессдозы активно реагируют на изменение вида напряженного состояния, оцениваемого соотношениями $\xi = \sigma_3 / \sigma_1$ и $\xi_1 = \sigma_2 / \sigma_1$, где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ - главные напряжения.

Для проверки возможности измерения напряжений, действующих в массиве по различным направлениям, в приборе трехосного сжатия фиксировались показания мессдоз, измеряющих вертикальные, горизонтальные и наклонные (45°) напряжения.

Из полученных результатов следует, что коэффициент вариации показаний различно ориентированной мессдозы, расположенной в плотном песке, при $\xi = 0,8$ и $\xi = 0,2$ составляет 7-10 %, в рыхлом песке - 10-12 % соответственно. Надежность показаний исследованных нами мессдоз проверялась по степени расхождения известной из теории напряжений зависимости $\sigma_1 - \sigma_3 = 2 \sigma_n$, где σ_n - напряжение, равно-наклоненное к направлениям действия напряжений σ_1 и σ_3 . Кроме того, этими же исследованиями проверено выполнение уравнений статического равновесия части массива грунта с моделью опорных

элементов горнотранспортного оборудования (по площади эпюр σ_z на различных горизонтальных уровнях как под подошвой модели, так и ниже нее). Оба упомянутых условия выполнены с достаточной точностью.

Полученные данные позволили произвести расшифровку показаний мессдозы при изучении напряженного состояния в породных массивах, сформированных в стендовых условиях с учетом его переменности вокруг мессдозы, что повысило достоверность результатов измерения напряжения в сравнении с традиционными методиками. Результатом проведенных исследований явилась новая методика градуировки мессдоз и рекомендации по их использованию в условиях переменного напряженного состояния техногенных массивов.

Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния насыпных массивов горных пород, находящихся под воздействием нагрузки, состояли из четырех серий опытов: в стендовых и натуральных условиях.

Первая серия опытов с использованием плотного и рыхлого песка выполнялась в лотке с размерами в плане $2,2 \times 1,6 \text{ м}$ и высотой $1,5 \text{ м}$. Для имитации опорных элементов горнотранспортного оборудования применялись жесткие штампы с шероховатой подошвой размером $0,3 \times 0,3 \text{ м}$; $0,3 \times 0,75 \text{ м}$; $0,3 \times 1,5 \text{ м}$ (№№ 1, 2 и 3 соответственно). Для измерения компонент напряжений применялись исследованные нами тензометрические мессдозы первого типа. Послойные вертикальные деформации вычислялись по перемещениям марок диаметром $3,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$, установленных вдоль центральной вертикали штампов и соединенных струнами с прогибомерами.

Вторая серия аналогичных опытов проведена с плотным песком в лотке с размерами в плане 3 x 3 м высотой 2,5 м; использовались штампы размером 0,3 x 0,3 м; 0,7 x 0,7 м и 0,3 x 1,5 м. Три компонента линейных деформаций в этом случае измерялись деформометрами конструкции Новочеркасского политехнического института в сочетании с прибором ЦТМ-5; диаметр рабочих пластин деформометров $-3,5 \cdot 10^{-2}$ м, база $-2,5 \cdot 10^{-2}$ м. С целью уточнения результатов опытов первой серии мессдозы и деформометры во второй серии опытов располагались между точками установки измерительных приборов в первой серии.

Лотки в каждом опыте заполнялись песком средней крупности, послойно уплотненным вибратором или же свободно отсыпанным, с плотностью породы в первом случае $1,76 \text{ т/м}^3$, во втором – $1,56 \text{ т/м}^3$.

Эпюры полученных главных напряжений σ_1 в основании каждого из штампов, использованных в первой серии опытов, в исследованном диапазоне внешней нагрузки имеют на глубине $h \approx 0,5$ в четко выраженный максимум; b – ширина штампа.

Обобщая полученные опытные данные, можно сказать, что исследованные вдоль центральной вертикали штампов напряжения σ_1 превышают установленные по теории линейно-деформируемой среды для нагрузки, передаваемой жестким штампом. Измеренные напряжения σ_1 в рассматриваемом случае как плотного, так и рыхлого основания могут быть вычислены по зависимостям $\sigma_1 = \sigma_1^T \cdot K_\sigma$, где σ_1^T – напряжения, устанавливаемые по теории линейно-деформируемой среды при равномерно распределенной нагрузке; $K_\sigma = a_0 + b_0 \cdot \sin(\pi z_1/d_0)$, где a_0 , b_0 , d_0 – параметры определенные опытом, $z_1 = z/b$ – от-

носительное заглубление точки. Сопоставляя наши результаты с данными других исследователей (штампы на песчаных и глинистых породах) можно заключить, что определенное опытным путем значения σ_1 существенно превышают таковые, вычисленные по теории упругости.

Горизонтальные напряжения σ_3 в исследованной породе под полосовым и $\sigma_3 = \sigma_2$ под квадратными штампами, начиная с некоторой глубины, также превышают вычисленные по теории линейно-деформируемой среды (до 250 %); в рассматриваемых условиях они аппроксимированы полиномом $\sigma_3 = \xi \cdot \sigma_1 = (a_1 + b_1 z_1 + c_1 z_1^2 + d_1 z_1^3 + e_1 z_1^4) \sigma_1$, где $a_1 - e_1$ – параметры, определенные опытом; $z_1 = z/b$. Для иных условий параметры, а возможно и вид аппроксимирующих функций могут быть иными.

Степень приближения напряженного состояния породы к предельному в точках, где измерялись напряжения, оценивалась величиной угла наибольшего отклонения θ_{\max}^0 , вычисленного по полученным значениям компонент напряжений. Во всех случаях при увеличении нагрузки угол θ_{\max}^0 увеличивался. Под каждым из штампов на глубине $h = (0,8-1,0) b$ эпюры θ_{\max}^0 имеют максимум: напряженное состояние здесь наиболее близко к предельному. Таким образом, по критериям напряженного состояния в техногенных массивах были выделены зоны, находящиеся в допредельном и предельном состояниях. Это, в свою очередь позволило обосновать применение характерных особенностей исследованного переменного напряженного состояния в приборах трехосного сжатия для оценки деформационных свойств пород.

В процессе увеличения внешней нагрузки происходит трансформация

эпюр вертикальных ε_1 и горизонтальных ε_3 деформаций песчаного массива.

Контроль точности измерения ε_1 осуществлен сравнением измеренных перемещений S штампов с результатами суммирования послойных деформаций основания. При малых нагрузках (близких к расчетному давлению R) эти значения практически совпадали, а при последних ступенях отличались на 5-12 %. Графики зависимости $\varepsilon_1 - p$ для всех точек плотного и рыхлого основания штампов №№ 1-4 были криволинейны.

Третья серия опытов была реализована с помощью испытательного стенда, разработанного и изготовленного в Читинском политехническом институте (а.с. № 1476378 СССР. МКИ G 01 N 33/24. Испытательный стенд для моделирования деформаций оснований / В.А. Бабелло и др. (СССР) – № 4258569/29-33; заявл. 08.06.1987; опубл. 30.04.1989. Бюлл. № 16. – 3 с.).

Стенд состоял из 11 силовых рам, установленных на расстоянии равном одному метру друг от друга, настила, силовых балок и связей. Длина стенда составляла 10 м, его ширина 3 м.

Перед началом испытаний настил стенда устанавливался в исходное горизонтальное положение. На поверхности настила формировалась насыпь высотой 1,0-1,5 м из песчаных пород. Для передачи нагрузки на насыпь использовались металлические жесткие штампы, имитирующие опорные элементы горнотранспортного оборудования. Нагрузка на штампы создавалась при помощи гидродомкратов. В тело насыпи устанавливались тензорезисторные преобразователи давления (ПД) типа ПДП-70/11 конструкции ЦНИИСК [2] (мессдозы второго типа). Для учета погрешностей ПД до и после испытаний в насыпи, производилась их породная и гидравличе-

ская градуировки в баках-одометрах и стабилонетрах.

Полученные результаты измерения компонент нормальных напряжений в теле нагруженной насыпи не выявили каких-либо принципиальных отличий от результатов I и II серий опытов. Дополнительно исследовалось влияние факторов системы «объект – насыпь – слабое основание» в процессе их взаимодействия.

Четвертая серия опытов (опытно-промышленный эксперимент) по изучению н.д.с. насыпей заключалась в том, что в отдельных точках отвала «Восточный» Уртуйского угольного разреза нами были измерены вертикальные и горизонтальные напряжения.

Измерения проводились с использованием мессдоз (преобразователей) второго типа. Всего было использовано 11 преобразователей, установленных в 8 точках внутри отвала в процессе его формирования. Два преобразователя измеряли горизонтальное и вертикальное напряжения в угловой точке 22, расположенной по горизонтали на расстоянии 4 м и по вертикали – на 0,56 м выше нижней точки откоса. По одному преобразователю для измерения вертикальных напряжений было установлено на глубине 7 м ниже бровки откоса (точка 231 и 285 соответственно). На таком же удалении от данной вертикали, но на глубине 3,5 м измерялись вертикальные напряжения в точках 227 и 283, то же — на глубине 1,75 м в точках 225 и 282. Вертикальное напряжение измерялось еще в одной точке, расположенной у поверхности откоса на расстоянии 5,6 м от вертикали, проходящей через бровку, и на глубине 6,4 м (точка 148).

Горизонтальные напряжения, кроме точки 22, измерялись в точках 148, 227 и 225.

Сравнение измеренных и рассчитанных с использованием модели упруго-идеальнопластической среды значений напряжений, показало, что упомянутая модель удовлетворительно оценивает напряженное состояние исследованного отвала.

Таким образом, для надежного прогноза напряженного состояния техногенных массивов горных пород, в т.ч. нагруженных горнотранспортным оборудованием возможны следующие варианты:

– установление общих закономер-

ностей, позволяющих внесение корректив в аналитические зависимости, описывающие распределение всех компонент напряжений в массиве, например, методами теории упругости;

– определение компонент напряжений численными методами, например, путем решения упруго-идеальнопластической задачи;

– установление индивидуальных закономерностей распределения напряжений в отвальных породах опытным путем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хейфиц В.З. Измерение напряжения в грунтах (обзор). – М.: ИНФОРМ-ЭНЕРГО. 1973. – 43 с.

2. Паспорт на тензорезисторный преобразователь давления ЦНИИСК типа ПДП – 70/11. – М.: Госстрой СССР. 1982 – 12 с. **ГИАС**

Коротко об авторе

Бабелло В.А. – кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной геологии гидрогеологии, Читинский государственный университет, babellovictor@mail.ru



ДИССЕРТАЦИИ

ТЕКУЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ О ЗАЩИТАХ ДИССЕРТАЦИЙ ПО ГОРНОМУ ДЕЛУ И СМЕЖНЫМ ВОПРОСАМ

Автор	Название работы	Специальность	Ученая степень
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. М.В. ЛОМОНОСОВА			
ВОЛКОВ Дмитрий Сергеевич	Особенности и методы изучения геологического строения Верхнедевонско-каменноугольных отложений северо-востока Республики Татарстан и поиск органогенных построек в осевой зоне Камско-кинельской системы прогибов	25.00.12	к.т.н.