Висновки та напрямки подальших досліджень. Розроблена методика визначення збитку гірничовидобувному підприємству в будь-яких гірничо-геологічних умовах і при переході на більш перспективні системи дозволяє знизити втрати балансово-промислових запасів до технічно можливого рівня. Економічна оцінка від експлуатаційних втрат балансово-промислових запасів, що складаються зі збільшення витрат на виконання частини виробничих процесів, збиток від розубоження за вмістом якісних показників корисних копалин, що визначаємо сумою непродуктивних витрат на видобувні процеси і збагачення, а також зменшенням вмісту показників цінності корисних копалин, що вилучаються з надр. Розрахунки на 1 т корисних копалин у балансово-промислових запасах вельми умовні і в ряді випадків можуть привести до неповноцінних висновків. Однак у практиці роботи шахт (кар'єрів) дуже часто в силу вкоренілої системи планування виробнича потужність залишається однаковою незалежно від втрат балансово-промислових запасів. Виходить, що річне зниження гірничих робіт не може бути однаковим при різних втратах балансово-промислових запасів і однаковому розубоженні за вмістом якісних показників корисних копалин у залізорудній масі. З обліком цього методи визначення збитку від втрат балансово-промислових запасів розраховуючи на 1 т корисних копалин у балансово-промислових запасах можуть застосовуватися досить широко, але далеко не завжди.

Список літератури

1. Временная методика определения экономической эффективности затрат и мероприятия по охране окружающей среды. - В кн.: Методы и практика определения эффективности капиталовложений и новой техники. М., Наука, 1982, с. 108-114.
2. Единые правила охраны недр при разработке месторождений твердых полезных ископаемых. М., Недра, 1987.
3. **Зарайский В.Н., Стрельцов В.И.** Рациональное использование и охрана недр на горнодобывающих предприятиях. М., Недра, 1987.
4. **Емельянов С.В.** Информационные технологии и вычислительные системы / **С.В. Емельянов.** - М.: ЛЕ-НАНД, 2008. - 112 с.
5. Методические рекомендации, по комплексной оценке, эффективности мероприятий, направленных на ускорение научно-технического прогресса. М., изд. ГКНТ СССР, 1988.
6. **Трыкин В.П., Симаков В.А.** Экономическая эффективность посортной и валовой добычи руды. М., Недра, 1987.
7. Типовая методика определения экономической эффективности капитальных вложений. - В кн.: Методы и практика определения эффективности капитальных вложений и новой техники. Вып. 33, М., Наука, 1982, с. 12-48.
8. **Шолох М.В.** Методика визначення і нормування вмісту якісних показників корисних копалин у промислово-балансових запасах. - Кривий Ріг: Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2016 р. - 160 с. Іл.
9. V. Hnyeushev. Peat in the Ukraine: Reflections on the Threshold of a New Millennium / «Peatland international», Finland, 2000, № 1, - с. 54-57
10. Peat Production Machinery. Bord na Mona Peat Energy Division, 2001
11. Manufacturer of machinery for peat moss industry. Les Equipment's Tardif inc. Quebec, Canada, 2002
12. **Chadwick J.** Ironclad Kiruna // International Mining - 2010. - July. - С. 8-15
13. Koppalkar, S. Effect of Operating Variables in Knelson Concentrators: A. Pilot-Scale Study. Ph. D Thesis / S. Koppalkar. - Mc Gill University, 2009. - Pp / 147.
14. **Beyer C.** Erfahrungen beim Abbau eines 9m mächtigen Kohlenpfeilers um eine Schachtröhre / C. Beyer. - Budapest, 1972. - 236 p.
15. Chambon C. Einfluß der gebauten Mächtigkeit und der Teufe auf die Strebkongvergenz / C. Chambon // Bergb. - Wiss.(13). - 1966. - P. 153-160.
16. Deeper open pits // International Mining. - № 10. - 2009. - P. 52-55.

Рукопис подано до редакції 17.03.17

УДК 001.891.574: 624.137

Р. А. ТИМЧЕНКО, д-р техн. наук, проф., Д. А. КРИШКО, канд. техн. наук,
В.О. САВЕНКО, аспірант, Криворозький національний університет

ФИЗИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПОДПОРНЫХ СТЕНОК И ОСНОВАНИЯ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ИХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

Цель. Проектирование оптимальных конструктивных решений с учетом конкретных условий эксплуатации одна из главных инженерных задач. Для подпорных стен, применяемых на подрабатываемых территориях с горизонтальными и вертикальными перемещениями грунта, эта задача является особенно важной.

Методы исследования. Многочисленные исследования поведения различных грунтов (лессовых просадочных, загипсованных, заторфованных, карстовых и т.п.) при замачивании показали, что их несущая способность и податливость (жесткость) находятся в тесной зависимости от степени их влажности. Результаты исследований, проведенных поляризационно-оптическим методом, носят в основном качественный характер в силу ряда допущений, связанных с масштабностью моделирования и идеализаций модели основания. Теоретической основой для моделирования методом эквивалентных материалов служит учение о подобии, которое является научным методом постановки эксперимента, обработки его результатов и распространения этих результатов на натуральные явления. Три теоремы теории подобия позволяют проанализировать уравнения, описывающие натурный и модельный процесс, вывести условия моделирования в виде критериев подобия и выбрать масштабные коэффициенты (константы подобия). В качестве грунта основания в моделях использовался суглинок нарушенной структуры. Моделью подпорной стенки принята подпорная стенка специального типа, а именно монолитная подпорная стена уголкового типа, которая имеет вертикальный и горизонтальный элементы на поверхности, которых, с контактной стороны, размещены опорные части и пустоты в виде усеченных пирамид одинакового размера и направленных меньшим основанием вглубь вертикального и фундаментного элементов.

Научная новизна. Разработке новых конструктивных решений подпорных стен способных воспринимать дополнительное воздействие от неравномерно деформируемого основания.

Практическая значимость. Изготовление моделей основания и подпорной стенки позволит изучить процесс контактного взаимодействия подпорной стенки и деформируемого основания, а также получить математические закономерности их совместной работы.

Результаты. Используя положения теории подобия, изготовлены модели основания и подпорных стен, имеющих жесткостные и прочностные характеристики, соответствующие натурному грунту и натурным конструкциям.

Ключевые слова: модель основания, модель подпорной стенки, теория подобия, контактное взаимодействие.

doi: 10.31721/2306-5435-2017-1-102-56-61

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Проектирование оптимальных конструктивных решений с учетом конкретных условий эксплуатации одна из главных инженерных задач. Для подпорных стен, применяемых на подрабатываемых территориях с горизонтальными и вертикальными перемещениями грунта, эта задача является особенно важной. Экспериментальные исследования показали, что напряженно-деформированное состояние основания во многом определяется характеристиками конструкции условиями работы и нагружения [1]. В связи с этим возникает необходимость в разработке новых конструктивных решений подпорных стен способных воспринимать дополнительное воздействие от неравномерно деформируемого основания.

Анализ исследований и публикаций. В настоящее время данная проблема актуальна для подрабатываемых территорий и для просадочных грунтов, т.к. при сложных деформациях основания не всегда можно реализовать имеющиеся технические решения в виду их непригодности к условиям работы. Существующие конструкции подпорных стен не рассчитаны на дополнительные усилия от горизонтального сдвижения грунта, который вызывает концентрацию напряжений в нижней части лицевой плиты, что соответственно приводит к разрушению конструкции.

Многочисленные исследования поведения различных грунтов (лессовых просадочных, загипсованных, заторфованных, карстовых и т.п.) при замачивании показали, что их несущая способность и податливость (жесткость) находятся в тесной зависимости от степени их влажности. При этом повышение влажности сопровождается снижением жесткостных характеристик основания, что может вызвать неравномерное оседание. Результаты исследований проведенных поляризационно-оптическим методом носят в основном качественный характер в силу ряда допущений, связанных с масштабностью моделирования и идеализаций модели основания [2].

Постановка задачи. Целью исследований является подготовка моделей основания и подпорной стенки, с применением положений теории моделирования, для изучения их контактного взаимодействия.

Изложение материала и результаты. При моделировании применялся метод расширенного подобия, в котором выдерживаются геометрические, механические и силовые аналоги с реальным объектом (рис. 1).

Теоретической основой для моделирования методом эквивалентных материалов служит учение о подобии, которое является научным методом постановки эксперимента, обработки его результатов и распространения этих результатов на натуральные явления [3]. Три теоремы теории подобия позволяют проанализировать уравнения, описывающие натурный и модельный процесс, вывести условия моделирования в виде критериев подобия и выбрать масштабные ко-

эффиценты (константы подобия) [4,5].

Напряженное состояние основания может быть представлено при моделировании решениями задач теории линейно-деформируемой среды и теории предельного равновесия.

Рис. 1. Схема лотка для моделирования контактного взаимодействия подпорной стенки и деформируемого основания: 1 - лоток; 2 - модель подпорной стенки; 3 - грунт засыпки; 4 - грунт основания; 5 - груз; 6 - индикаторы часового типа; 7 - рамка для установки индикаторов часового типа; 8 - металлическая пластина; b - ширина подошвы фундамента подпорной стенки; d - глубина заложения фундамента; h - высота подпорной стенки; y - высота подпора грунта

Работа грунта в упругой стадии характеризуется двумя уравнениями равновесия и уравнением совместности, в пластической – уравнением предельного равновесия

$$\frac{d\sigma_x}{dx} - \frac{d\tau_{xz}}{dz} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{d\sigma_x}{dx} - \frac{d\tau_{xz}}{dz} + \gamma = 0 \quad (2)$$

$$\Delta^2 \Phi_x + \sigma_z = 0 \quad (3)$$

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 = \sigma_1 + \sigma_2 + 2 \cdot \sigma_o \cdot \sin \varphi. \quad (4)$$

Два явления в натуре и в модели подобны, если в модели выдержаны равенства определяющих критериев подобия и граничные условия.

При подобном очертании подошв натурного и модельного инженерного сооружения (геометрический масштаб $ab = b' : b$) в сходственных точках должны выполняться соотношения

$$\begin{aligned} \sigma'_x &= \alpha_n \cdot \sigma_x, \tau'_{xz} = \alpha_n \cdot \tau_{xz}, \varphi' = \alpha_\varphi \cdot \varphi \\ \sigma'_z &= \alpha_n \cdot \sigma_z, \gamma' = \alpha_\gamma \cdot \gamma, c' = \alpha_c \cdot c, \end{aligned} \quad (5)$$

где $\alpha_n, \alpha_\gamma, \alpha_\varphi, \alpha_c$ – масштабные коэффициенты соответственно для напряжений, объемного веса, угла внутреннего трения, сил сцепления.

Записав уравнения (1-4) для модели, подставив вместо $\sigma'_x, \sigma'_z, \tau'_{xz}, \gamma', \sin \varphi'$ их значение (5), составив из масштабных коэффициентов индикаторы подобия и приравняв их 1, получаем следующие критерии подобия при моделировании грунта

$$\alpha_n = \alpha_c = \alpha_b \cdot \alpha_\gamma; \alpha_\gamma = 1. \quad (6)$$

Необходимость выполнения условия $\alpha_i = \alpha_b \cdot \alpha_\gamma$ обусловлена уравнениями равновесия и не зависит от области работы грунта. Подставляя значения масштабных коэффициентов, получаем формулу модуля общей деформации грунта модели E'_0

$$\alpha_n = \frac{E'_0}{E_0}; \alpha_b = \frac{b'}{b}; \alpha_\gamma = \frac{\gamma'}{\gamma}; E'_0 = \frac{b'}{b} \cdot \frac{\gamma'}{\gamma} \cdot E_0. \quad (7)$$

Равенство $\alpha_n = \alpha_c$ и $\alpha_\gamma = 1$ определяется условием предельного напряженного состояния.

Используя их, получим формулу, определяющую величину сцепления модельного грунта через характеристики грунта натуре

$$\alpha_c = \frac{c'}{c}; c' = \frac{b'}{b} \cdot \frac{\gamma'}{\gamma} \cdot c \quad (8)$$

Для углов внутреннего трения натуре и модели: $\operatorname{tg} \varphi' = \operatorname{tg} \varphi$.

Важным при моделировании предельного состояния грунтового массива является учет объемных сил. С этой целью множитель подобия по объемному весу назначаем равным единице. Тогда множители подобия модуля деформации и сцепления материала модели и основания будут равны множителю подобия линейных размеров модели подпорной стенки

$$\alpha_\gamma = 1; \alpha_E = \frac{E'_0}{E_0} = \frac{b'}{b}; \alpha_c = \frac{c'}{c} = \frac{b'}{b} \quad (9)$$

Подобрав определенный состав смеси, имитирующий грунт так, чтобы величины ее физико-механических характеристик удовлетворялись формулами (8), (9), получим искомый эквивалентный материал.

В качестве грунта основания в моделях использовался суглинок нарушенной структуры. Для создания однородного основания грунт высушивали до полной потери влажности и измельчали путем растирания в ступе до порошкообразного состояния. После чего полученный порошок просеивали через сито с диаметром отверстий 0,5 мм. Учитывая необходимую влажность грунта, его плотность и объем определяли необходимое количество порошка и воды для его увлажнения. Увлажнение проводили распылителем постепенно постоянно помешивая смесь.

Основание из пасты укладывалось слоями по 15 мм (рис. 2), уплотнение выполнялось трамбовкой, выполненной в виде стержня с приваренным основанием круглого сечения весом 200 г.

Рис. 2. Подготовка модели основания: а – послойная укладка смеси; б – общий вид лотка

Для контроля плотности и влажности грунта каждые 100 мм по высоте отбирали две пробы для анализа.

Определение физико-механических свойств модели основания проводилось с помощью полевой лаборатории ПЛЛ-9 (рис. 3) в соответствии с методикой [6]. Результаты физико-механических характеристик отобранных проб приведены в табл. 1. Сравнительная характеристика грунтов представлена в табл. 2.

Рис. 3. Настройка прибора: а – ПЛЛ-9; б – определение характеристик грунта

Моделью подпорной стенки принята подпорная стенка специального типа (ПССТ) (рис. 4б), а именно монолитная подпорная стена углового типа, которая имеет вертикальный и горизонтальный элементы на поверхности которых, с контактной стороны, размещены опорные части и пустоты в виде усеченных пирамид одинакового размера и направленных меньшим основанием вглубь вертикального и фундаментного элементов.

Под подошвой фундаментной плиты и с тыльной стороны вертикального элемента расположены два листа упругоподатливого материала из биополимера [7-9].

Таблица 1

Результаты испытания проб

Номер точки	Глубина отбора пробы от верха массива, м	Объемный вес, γ , т/м ³	Модуль деформации, E , МПа	Параметры сдвига		
				tgφ	φ°	c
1	2	3	4	5	6	7
1	0,1	1,733	5,5	0,38	21	8,5
2	0,2	1,732	5,3	0,33	18	8,0
3	0,3	1,723	5,2	0,36	20	2,5
4	0,4	1,683	4,8	0,61	31	2,5

Таблица 2

Сравнительная характеристика грунтов

Наименование грунта	Физико-механические характеристики основания			
	E , МПа	c , кПа	γ , т/м ³	φ, град.
Натурный грунт	28	34	1,71	26
Модельное основание	5,62	6,8	1,71	26
Коэффициент перехода	1/5	1/5	1	1

Рис. 4. Модели подпорных стен: *а* – угловая подпорная стенка; *б* – подпорная стенка специального типа

С развитием деформирующей нагрузки во времени, то есть с вертикальными и горизонтальными перемещениями грунта по отношению к монолитной стене углового типа, после ее установки, происходит постепенное проникновение грунта в пустоты. Преждевременное заполнение пустот предотвращается листами упругоподатливого материала.

Конструктивное решение модели подпорной стенки специального типа имеет такой набор факторов, который является оптимальным для смоделированного основания [10-13]. Значения факторов, при которых получено максимальное значение несущей способности подпорной стенки имеют следующие значения: контактная площадь опорных призматических участков – $0,09 \text{ м}^2$; объем полостей – $0,216 \text{ м}^3$; угол резания – 90° .

Формование моделей подпорных стен производилось с использованием металлической опалубки и полых структур, закрепленных на днище и с тыльной стороны вертикального элемента с заданным шагом.

Для изготовления моделей использовали бетон мелкой фракции на портландцементе М400 с В/Ц = 0,37. В качестве мелкого заполнителя использовали кварцевый песок. Армировали образцы металлической сеткой с ячейкой 10 мм. Приготовление бетонной смеси осуществляли в бетоносмесителе принудительного действия. Подвижность приготовленного бетона должна составлять 10...15 см. При этом заполнители (песок) должны быть высушены до постоянной массы при температуре не выше 80°C и охлаждаться до комнатной температуры.

Укладка бетонной смеси производилась в форму вручную с виброуплотнением до появления на поверхности цементного молока. Одновременно с изготовлением моделей забивались кубики с размером ребра 150 мм. Испытание кубиков показало класс бетона С20/25. Технологически правильное выполнение работ обеспечило хорошее качество бетона без раковин и пустот.

Выводы и направление дальнейших исследований. Используя положения теории подобия, изготовлены модели основания и подпорных стен, имеющих жесткостные и прочностные характеристики соответствующие натурному грунту и натурным конструкциям. В дальнейшем это позволит изучить процесс контактного взаимодействия подпорной стенки и деформируемого основания, а также получить математические закономерности их совместной работы.

Список литературы

1. Тимченко Р. А. Работа плитных фундаментов-саморегуляторов (ПФС) на неравномерно-деформируемом основании / Р. А. Тимченко, Д. А. Кришко // Современные проблемы строительства. – Донецк, 2010. – №8 – С. 34-38.
2. Тимченко Р. А. Работа саморегулирующихся фундаментов при заданных вертикальных деформациях основания / Р. А. Тимченко, Г. Л. Турабелидзе // Деп. в ВНИИС – Кривой Рог, КГРИ. – 1989. – Вып. 11. – № 10159. – 8с.
3. Козлов В. П. О переходных коэффициентах при моделировании взаимодействия подрабатываемых сооружений с основанием на естественном грунте /В. П. Козлов// Сборник науч. труд. в ДонпромстройНИИ проекта. – 1965. – № 6. – С. 31-43.
4. Кирпичев М. В. Теория подобия //М. В. Кирпичев/. – М.: Издательство АН СССР. – 1953 – 94 с.
5. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике.//Л. И. Седов / – М.: Государственное издательство технической литературы. – М.: 1954. – 326 с.
6. ДСТУ Б В.2.1-4-96 (ГОСТ 12248-96). Грунти. Методи лабораторного визначення характеристик міцності і деформованості. – К.: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури. – 1997 – 102 с.
7. Пат. 62715 Україна, МПК Е 02D 29/02. Підпірна стінка: 62715 Україна, МПК Е 02D 29/02 Вілкул Ю.Г., Тимченко Р.О., Кришко Д.А., Дмитрієва К.Ю., Бондар Ю.М. (Україна). – № у 200305; Заявл. 08.05.2003; Опубл. 15.12.2003, Бюл. № 12. – 4 с.

8. Пат. 23839 Україна, МПК Е 02D 29/02. Підпірна стінка: 23839 Україна, МПК Е 02D 29/02 Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Муненко А.М., Ківа М.В., Литвиненко О.С. (Україна). – № u 2007 00594; Заявл. 22.01.2012; Опубл. 11.06.2012, Бюл. № 8. – 4 с.

9. Пат. 8669 Україна, МПК Е 02D 27/00. Підпірна стінка для зсувних територій: 8669 Україна МПК Е 02D 27/00 Тімченко Р.О., Вілкул Ю.Г., Терещенко Р.Я., Кочергін П.С. (Україна). – № u 200501025; Заявл. 04.02.2005; Опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8. – 4 с

10. Тімченко Р. О. Обґрунтування вибору лінійної моделі регресії у плануванні експерименту для вирішення поставленого експериментального завдання / Р. О. Тімченко, Д. А. Крішко, Л. В. Кадол, В. О. Савенко // Містобудування та територіальне планування – К.: КНУБА, 2016. – Вип. 59 – С. 425-431.

11. Тімченко Р. А. Оптимизация конструктивного решения подпорной стены специального типа на основании линейной модели регрессии / Р. А. Тімченко., Д. А. Крішко, В. О. Савенко // Вісник КНУ. – Кривий Ріг: КНУ, 2016. – Вип. 41. – С. 54-58.

12. Тімченко Р. О. Застосування програм заснованих на методі скінченних елементів (МСЕ) для моделювання роботи системи «основа-інженерна споруда» / Р. О. Тімченко, Д. А. Крішко, В. О. Савенко // Строительство, материаловедение, машиностроение (сб. научн. трудов). – Д., ГВУЗ ПГАСА, 2016. – С. 143-148.

13. Особенности конструктивного решения массивной подпорной стенки для неблагоприятных территорий / Р. А Тімченко, Д. А. Крішко, О. В. Субота, О. С. Мокшина //Вісник КТУ. – Кривий Ріг: КТУ, 2007. – Вип. 16. – С. 136-139.

Рукопис подано до редакції 19.03.17

УДК 621.874

С.І. САХНО, Л.О. ЯНОВА, О.В. ПИЩИКОВА, кандидати техн. наук, доц.

Криворізький національний університет

АНАЛІЗ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МЕТАЛОКОНСТРУКЦІЙ МОСТОВОГО КРАНА МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Мета. Знаходження вразливих місць в конструкції мостових кранів, що вичерпали ресурс експлуатації, шляхом дослідження напруженого стану конструкції методом кінцевих елементів. Створення математичної моделі реального крана, що застосовується на підприємствах Криворізького басейну.

Методика. Дослідження моделі виконувалось в SolidWorks корпорації Dassault Systemes. На даному етапі досліджень враховувались статичні навантаження. Метод кінцевих елементів дозволив створити математичну твердотільну модель крана, що досліджується. При наявності точних креслень конструкції та характеристик матеріалів, що в ній застосовується, з'являється можливість спрогнозувати найбільш вірогідні місця руйнування крану, та виявити сполучення факторів, при яких такі руйнування можливі.

Наукова новизна. В результаті досліджень набуло подальшого розвитку застосування методу кінцевих елементів для запобігання критичних станів кранових конструкцій, що вичерпали ресурс експлуатації.

Практична значимість. Запропонована методика дає можливість більш точно і з меншими витратами прогнозувати надійність кранових конструкцій, що вичерпали ресурс експлуатації.

Результати. Достовірні результати досліджень напруженого стану, переміщень і частоти власних коливань можуть бути досягнуті за умови застосування в моделі матеріалів з характеристиками, що відповідають реальним матеріалам, реальних навантажень і при призначенні правильних кріплень елементів крана. Розроблена твердотільна математична модель крана для дослідження впливу зовнішніх факторів на напружений стан конструкції. Запропонована методика дослідження дозволяє швидко і з незначними витратами виявити найбільш суттєві фактори, що можуть впливати на рівень безпечної експлуатації крана. Наведені результати впливу зовнішніх статичних навантажень на напружений стан в елементах конструкції, прогини конструкції та її власні частоти.

Ключові слова: мостовий кран, метод кінцевих елементів, САПР, надійність конструкції крану.

doi: 10.31721/2306-5435-2017-1-102-61-67

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. На підприємствах України і сьогодні експлуатується велика кількість мостових кранів, що випрацювали свій ресурс та були виготовлені більш ніж 30-60 років тому [1]. Особливістю цих кранів є те, що при їх проектуванні та виготовленні використовувались методи та матеріали, що не відповідають сучасним вимогам. Зокрема, застосовувались конструктивні рішення, які призводили до підвищеної концентрації напружень в конструкції, а в якості матеріалів застосовувались низькоякісні сталі схильні до крихкого руйнування [2]. Недосконалість методів розрахунків і матеріалів примушувало розробників приймати завищені коефіцієнти запасу міцності, що з одного боку збільшувало надійність конструкції, а з іншого - значно збільшувало її вагу і власні прогини.