

**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 виробничих потужностей 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.: ЛЕНАНД, 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 Strebkonvergenz / 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, аспирант, Криворожский национальный университет

### **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 натуральный 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.

**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.

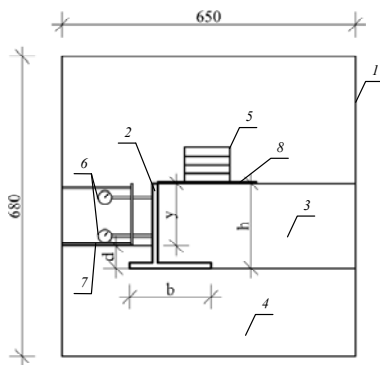
Многочисленные исследования поведения различных грунтов (лессовых просадочных, загипсованных, заторфованных, карстовых и т.п.) при замачивании показали, что их несущая способность и податливость (жесткость) находятся в тесной зависимости от степени их влажности. При этом повышение влажности сопровождается 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 натуральный и модельный процесс, вывести условия моделирования в виде критериев подобия и выбрать масштабные коэффициенты (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 подпора грунта;  $y$  - высота подпора грунта

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

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

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

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

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 = (\sigma_1 + \sigma_2 + 2 \cdot \sigma_0) \cdot \sin \varphi. \quad (4)$$

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

При подобном очертании подошв натурального 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  $\alpha_n = \alpha_b \cdot \alpha_\gamma$  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 природы

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

Для углов внутреннего трения природы 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.

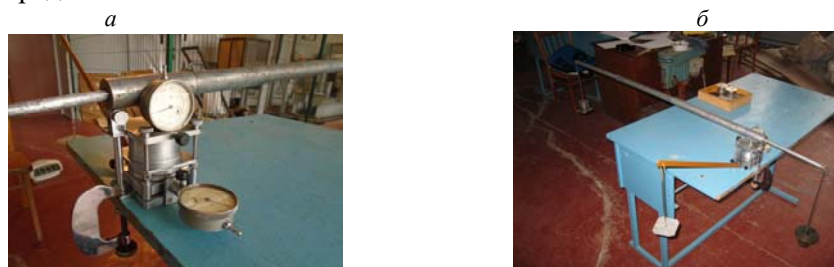


Рис. 3. Настройка прибора: а – ПЛЛ-9; б – определение характеристик грунта

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, $\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	Модуль деформации, $E$ , МПа	Параметры сдвига		
				$\text{tg}\varphi$	$\varphi^\circ$	$c$
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	$\gamma$ , т/м <sup>3</sup>	$\varphi$ , 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 проникновения 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 –  $90^\circ$ .

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  $80^\circ \text{C}$  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). – № у 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). – № у 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. Оптимізація конструктивного рішення підпорної стіни спеціального типу на основі лінійної моделі регресії / 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 Тимченко, Д. А. Кришко, 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<sup>1</sup>, 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.

**Методи досліджень.** Для дослідження напруженого стану в конструкції, розроблена математична твердотільна модель. Для розробки моделі використані креслення досліджуваного крана і реальні навантаження що ним сприймаються. Дослідження моделі виконувалось в SolidWorks корпорації Dassault Systemes. На даному етапі досліджень враховувались статичні навантаження.

**Результати.** 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.

**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.

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

**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.

Тим не менш, враховуючи скрутний фінансовий стан більшості підприємств України, на багатьох з них продовжується експлуатація застарілої техніки, що час від часу приводить до аварій і навіть людських жертв. Зрозуміло, що в цих умовах експлуатація застарілих кранів