

СНИЖЕНИЕ ЖИЗНЕННОГО РЕСУРСА ЗДАНИЙ ПРИ РЕГУЛЯРНЫХ ВЗРЫВНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Аннотация. Рассмотрен метод экспериментально-теоретической оценки ухудшения ресурса железобетонных конструкций жилых зданий в условиях постоянно действующих массовых промышленных взрывов мощностью от 500 до 700 т в карьере Южного горно-обогатительного комбината в г. Кривой Рог (Украина). На основе обработки многочисленных экспериментальных данных и результатов математического моделирования получена вероятностная модель прогноза ухудшения технического состояния железобетонных конструкций здания. Расчеты рисков разрушения несущих элементов здания для его уязвимых зон позволили уточнить срок эксплуатации (он уменьшился по сравнению с нормативным приблизительно на 30 лет).

Ключевые слова: ресурс, взрыв, риск, разрушение, эксперимент, расчет.

ВВЕДЕНИЕ

Вопросы оценки жизненного ресурса (ОЖР) зданий, влияния физического и динамического их износа рассматривались на государственном уровне в виде соответствующих постановлений Кабинета Министров Украины [1, 2], нормативных документов Украины [3], также в работах отечественных и зарубежных исследователей Б.Е. Патона, Э. Витиелло, И. Идрисса, А. Корнелла, Г.Л. Коффа, Н.Г. Марьенкова, С.В. Медведева, Ю.И. Немчинова, А.Н. Трофимчука и др. [4–9]. Существующие методы ОЖР и паспортизации условно можно разделить на три группы: экспертные оценки, расчетно-аналитические методы и техническая диагностики.

В настоящей статье предлагается объединить их в единый метод ОЖР, который включает:

- экспериментальные исследования динамической реакции зданий или сооружений на взрывные воздействия и визуальный осмотр;
- математическое моделирование исследуемого объекта;
- системное объединение результатов исследований и их итоговый анализ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим пример исследования динамического воздействия (массовый взрыв в открытых железорудных карьерах г. Кривой Рог) на здание жилого фонда, где условная граница санитарно-охранной зоны непосредственно прилегает к территории городской застройки, а в некоторых случаях и пересекает ее. Вибродиагностику проведем для так называемого здания-представителя — Центра детского и юношеского творчества «Мрія» (Центра) Ингулецкого района г. Кривой Рог. На рис. 1 дана схема регистрации прохождения грунтовых и воздушных ударных волн от массовых взрывов на карьере Южного горно-обогатительного комбината (ЮГОК).

На основании регистрации и обработки экспериментальных данных был получен характерный амплитудный спектр виброускорений здания Центра (рис. 2), согласно которому экспериментальные значения основных частот собственных колебаний f_i (и периодов T_i) по формам колебаний составили:

- по направлению X : $f_1 = 4,25$ Гц ($T_1 = 0,235$ с), $f_2 = 6,70$ Гц ($T_2 = 0,149$ с);
- по направлению Y : $f_1 = 4,50$ Гц ($T_1 = 0,222$ с), $f_2 = 5,40$ Гц ($T_2 = 0,185$ с).

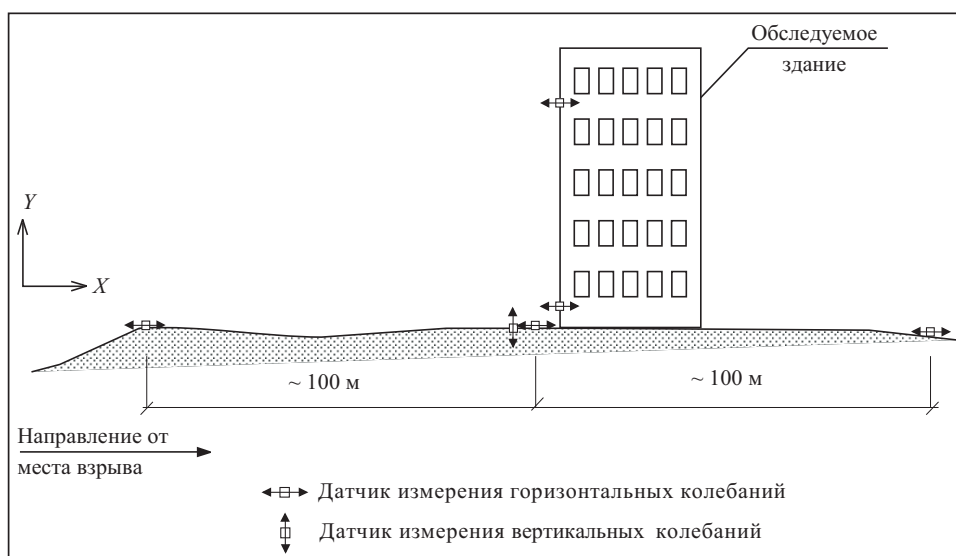


Рис. 1. Схема регистрации прохождения грунтовых и воздушных ударных волн от массовых взрывов и размещение датчиков

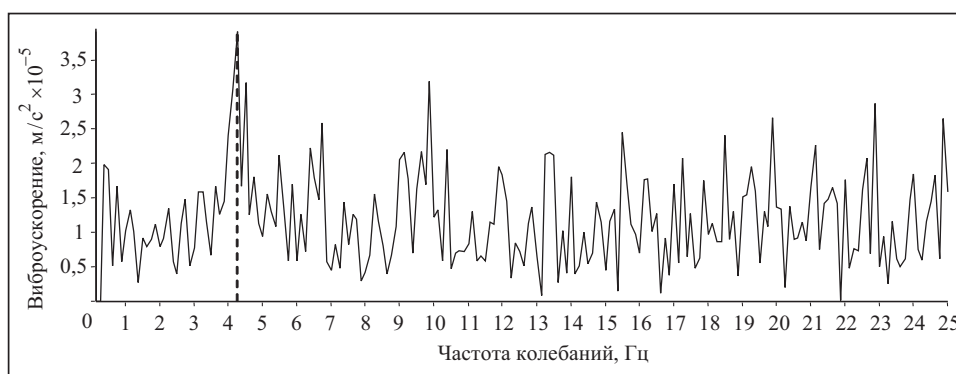


Рис. 2. Амплитудный спектр горизонтальных виброускорений здания Центра

В результате обработки многочисленных экспериментальных данных относительно ускорений и виброскорости грунта и конструкций здания можно сделать следующие выводы.

— Зарегистрированные на протяжении 2008–2015 гг. виброускорения грунта в основании Центра находятся в диапазоне $[2,4–64 \text{ см/с}^2]$. Согласно [10] в целях исключения осадок фундаментов зданий при взрывах виброускорение грунта не должно превышать 15 см/с^2 .

— Значения виброскорости грунта в основании Центра находятся в диапазоне $[0,03–1,2 \text{ см/с}]$, что соответствует одному–трем (четырем) баллам по шкале сейсмической интенсивности Медведева [11].

— Установлено, что преобладающие частоты находятся в диапазоне 1–48 Гц, что подтверждает возможность колебаний конструкций Центра (перекрытия, стены) в режиме, близком к резонансному.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЦЕНТРА

Компьютерная модель здания была разработана на основе метода конечных элементов с помощью программного комплекса ЛПА [12]. Реализованный ва-

риант метода конечных элементов (МКЭ) использует принцип возможных перемещений:

$$a(u, v) = (f, v), \quad (1)$$

где u — искомое точное решение; v — любое возможное перемещение; $a(u, v)$, (f, v) — возможные работы внешних и внутренних сил.

Расчетная область, которая занята конструкцией, разбивается на конечные элементы (КЭ) Ω_r , вводится нумерация узлов КЭ и их степени свободы L_i (перемещения и углы поворота узлов КЭ). Приближенное решение U_h удовлетворяет кинематическим условиям и находится в виде линейной комбинации базисных функций:

$$U_h = \sum_{i=1}^N r_i \mu_i, \quad (2)$$

где r_i — параметры, μ_i — базисные функции, N — количество степеней свободы.

Пусть K — матрица жесткости с элементами $k_{i,j} = a(\mu_i, \mu_j)$, P — вектор нагрузок с элементами $P_i = (f, \mu_i)$, а X — вектор-столбец неизвестных с элементами u_i . Тогда (1) с учетом (2) можно преобразовать к следующей матричной форме:

$$KX = P. \quad (3)$$

С использованием МКЭ исходная задача свелась к системе линейных алгебраических уравнений (3).

Динамический расчет конструкций формулируется в виде вариационного равенства с начальными условиями:

$$\begin{cases} b\left(\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, v\right) + c\left(\frac{\partial u}{\partial t}, v\right) + a(u, v) = (f(t), v), & t > 0, \\ u(0) = u^0, \\ \frac{\partial u}{\partial t}(0) = u^1, \end{cases} \quad (4)$$

где $u(t)$ — точное решение; $b(u, v)$, $c(u, v)$ — возможные работы инерционных и демпфирующих сил; u^0 , u^1 — начальные значения перемещения и скорости.

Реализованный в ПК ЛПРА метод решения динамической задачи заключается в сочетании МКЭ с разложением искомого решения по формам собственных колебаний:

$$U_h = \sum u_i(t) \mu_i, \quad (5)$$

где $u_i(t)$ — скалярные функции; μ_i — базисные функции соответствующей статической задачи. Подставив в (4) U_h вида (5) вместо u , а также μ_j ($j=1, N$) вместо v , получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений

$$M \frac{d^2 x(t)}{dt^2} + C \frac{dx(t)}{dt} + Kx(t) = P(t), \quad (6)$$

где $x(t)$, x^0 , x^1 — векторы с элементами $x_i(t) = u_i(t)$, $x_i^0 = L_i u^0$, $x_i^1 = L_i u^1$; M, C — матрицы масс и демпфирования с элементами соответственно $m_{i,j} = b(\mu_i, \mu_j)$, $c_{i,j} = c(\mu_i, \mu_j)$.

Система (6) решается методом разложения по формам собственных колебаний. Пусть λ_i, φ_i — решение задачи на собственные значения; $\langle M\varphi_i, \varphi_i \rangle = 1$, где символ $\langle \dots \rangle$ обозначает скалярное произведение. Тогда

$$K\varphi = \lambda M\varphi. \quad (7)$$

Задача на собственные значения (7) рассчитывается методом итерации. Считая, что в (6) $x(t) = \sum_{i=0}^N y_i(t)\varphi_i$, из ортогональности функций φ_i получим (при определенных предположениях относительно матрицы C), что эта система разложится на независимые уравнения относительно $y_i(t)$:

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2} y_i(t) + 2\xi_i \omega_i \frac{d}{dt} y_i(t) + \omega_i^2 y_i(t) &= P_i(t), \quad t > 0, \\ y_i(0) &= y_i^0, \\ \frac{d}{dt} y_i(0) &= y_i^1, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\omega = \lambda_i^{-0.5}$, $0 < \xi_i < 1$, $P_i(t) = \langle P(t), \varphi_i \rangle$, $y_i^0 = \langle x^0, M\varphi_i \rangle$, $y_i^1 = \langle x^1, M\varphi_i \rangle$.

Решение уравнения (8) имеет вид

$$\begin{aligned} y_i(t) &= e^{-\xi_i \omega_i t} \left(\frac{y_i^1 + y_i^0 \xi_i \omega_i}{\omega_i} \sin \bar{\omega}_i t + y_i^0 \cos \bar{\omega}_i t \right) + \\ &+ \frac{1}{\bar{\omega}_i} \int_0^t P_i^{-\xi_i \omega_i(t-\tau)}(\tau) \sin \bar{\omega}_i(t-\tau) d\tau, \end{aligned} \quad (9)$$

где $\bar{\omega}_i = \omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2}$.

Компьютерная модель здания Центра была создана на основе следующих типов конечных элементов: стержневых элементов типа № 10 пакета ЛПРА (шесть степеней свободы в узле), пластинчатых элементов типов №№ 41, 42, 44 пакета ЛПРА (шесть степеней свободы в узле) [10]. Сервисная опция главного меню пакета ЛПРА «Закрепление здания» выполнено для уровня основания. Для узлов пластинчатых элементов, примыкающих к основанию, допускались угловые перемещения. Узлы колонн на уровне основания были заземлены.

Для проведения численных исследований созданы две расчетные схемы Центра: схема 1, в которой отсутствуют повреждения, и схема 2 с основными повреждениями в несущих стенах здания. На рис. 3 представлен в компьютерной модели участок несущей стены по оси с кривой трещиной (по схеме 2). Моделирование трещины осуществлялось путем разделения узлов элементов, сопрягаемых по линии трещины, и объединением перемещений для этих узлов в направлении существующих связей.

Расчетная схема 1 отражала исходное состояние здания на момент ввода его в эксплуатацию (в период с 1969 по 1971 гг.). Динамические параметры Центра по схеме 1, полученные на основании теоретических расчетов, принимались в качестве исходных. Расчетная схема 2 отражает состояние здания на момент обследования (май 2013 год). Динамические параметры здания принимаются для дальнейшего анализа, если они близки к экспериментальным данным, или при необходимости корректируются итерационными расчетами путем уточнения расчетной схемы 2. Цифровые значения динамических параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) компьютерной модели здания Центра являются главными критериями для проверки ее корректности (сравнение проводилось на основании результатов экспериментального и визуального обследований здания Центра).

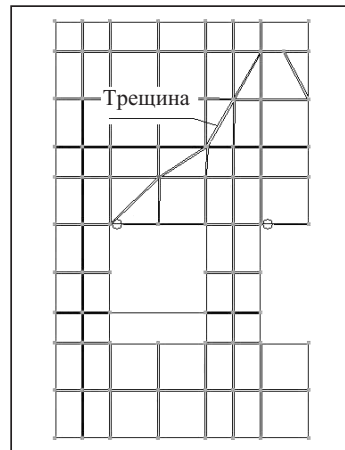


Рис. 3. Представление в компьютерной модели 2 трещины на поврежденном участке

Таблица 1. Численные значения частот собственных колебаний для расчетной схемы 2 здания Центра с повреждениями

Номер формы колебаний	Частота колебаний, Гц	Период колебаний (T), с	Сумма модальных масс при динамических воздействиях от массовых взрывов ВВ, %	
			по X	по Y
1	4,561	0,219	55,570	12,725
2	4,693	0,213	59,979	65,489
3	5,161	0,194	59,997	65,607
4	5,355	0,187	60,006	65,609
5	5,669	0,176	60,046	65,635
6	5,712	0,175	60,046	65,639
7	6,219	0,161	75,127	72,458
8	6,246	0,160	76,368	73,025
9	6,678	0,150	76,927	74,082
10	6,751	0,148	76,934	74,092

Примечание. Формы колебаний, которые являются определяющими для динамического НДС здания Центра, выделены жирным шрифтом.

В общем случае предусматривается задание четырех типов нагрузок: статические нагрузки; нагрузки, характеризующие инерционные свойства; динамические нагрузки; демпфирующие характеристики конструкции. В данном случае нагрузки и воздействия задавались в соответствии с государственными строительными нормами Украины [13], учет сейсмических воздействий выполнялся согласно [14]. Граничные условия в расчетной схеме были заданы непосредственно на узлы КЭ, а также смоделированы с помощью связей конечной жесткости. После задания двух–четырёх нагрузок в последовательности, о которой было сказано выше, задавались параметры интегрирования уравнений движения. В результате были получены значения перемещений Центра вдоль координатных осей, силы и расчетные сочетания силовых воздействий для каждого конечного элемента. Расчеты выполнялись в нелинейной постановке. При проведении динамических расчетов по каждой из расчетных схем 1 и 2 число задаваемых форм колебаний соответствовало десяти. В табл. 1 приведены численные значения частот собственных колебаний здания Центра с повреждениями для расчетной схемы 2.

Собственные колебания компьютерной модели здания по форме 1 в направлении оси X (вдоль здания) и по форме 2 в направлении оси Y (поперек здания) показаны на рис. 4. Приведенные в табл. 1 значения частот и периодов собственных колебаний по формам 1, 2, 7 для компьютерной модели 2 здания близки к зарегистрированным экспериментальным значениям амплитудно-частотного спектра на рис. 2.

Таким образом, компьютерная модель 2 здания Центра с моделированием трещины несущей стены является корректной и принята в качестве исходной для проведения на ее основе численно-аналитических исследований.

ОЦЕНКА ЖИЗНЕННОГО РЕСУРСА ЦЕНТРА НА ОСНОВЕ СИСТЕМНОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАТУРНЫХ И ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

ОЖР Центра базируется на расчете приближенной оценки вероятности отказа железобетонных балок покрытия Центра на отметке 10.85 и верхнего пояса поперечной рамы на отметке 11.80. Эти несущие элементы покрытия являются наиболее ответственными конструктивными элементами кровли здания Центра и поэтому могут быть приняты для ОЖР. Расчеты рисков разрушений выполнены для двутавровой балки перекрытия ($h = 1,2$ м и $L = 15$ м), шарнирно опертой на продольные стены здания и верхний пояс поперечной рамы

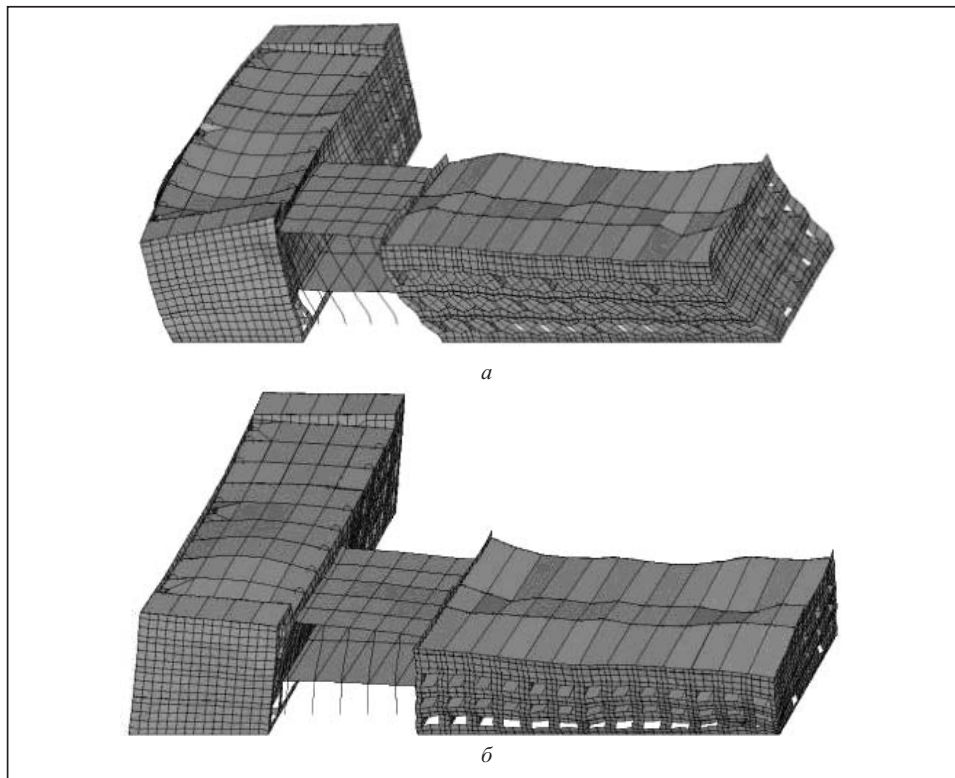


Рис. 4. Собственные колебания Центра на компьютерной модели 2 по форме 1 в направлении оси X при $T = 0,219$ с (а) и форме 2 в направлении оси Y при $T = 0,213$ с (б)

($h = 1,0$ м и $L = 12$ м). Сечение, армирование балки и пояса рамы, а также другие прочностные характеристики элементов кровли были приняты согласно проекту. С учетом результатов математического моделирования НДС здания Центра в ПК ЛПРА выполнен расчет рисков по формуле

$$\text{risk} = \Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt,$$

где z — отношение математического ожидания разности изгибающих моментов (предельного и суммарного), рассчитанных в ПК ЛПРА, к его нормативному значению.

Риск разрушения для балки перекрытия составил $\text{risk} = \Phi(-3,814) < \Phi(-3,29)$; для верхнего пояса рамы $\text{risk} = \Phi(-6) < \Phi(-3,29)$. Расчетные данные рисков разрушения графически представлены на рис. 5 в точке 1 для балки и в точке 2 — для пояса рамы. Полученные значения риска разрушения для указанных конструкций на время исследований удовлетворяли необходимым показателям прочности. Однако здание за период эксплуатации более чем 40 лет подвергалось периодическим воздействиям ударных грунтовых волн от взрывов на карьерах и накопило много скрытых и открытых дефектов в конструктивных элементах, которые не были учтены при расчетах. В процессе визуальных обследований Центра было зафиксировано нарушение стыков панелей перекрытия первого этажа, что свидетельствует о волнообразных перемещениях стыков при взрывных динамических воздействиях. Ввиду образования значительных зазоров между плитами перекрытий их жесткость как единого горизонтального диска постоянно снижается и соответственно снижается интегральная жесткость здания Центра в целом.

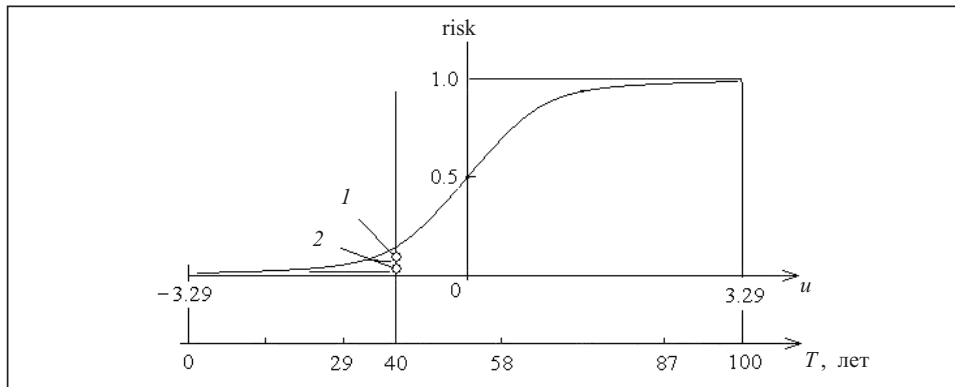


Рис. 5. График функции $\text{risk} = \Phi(u)$ в соответствии с текущим возрастом здания

По действующим строительным нормам период эксплуатации зданий жилого и культурного назначения устанавливается в 100 лет. Кривая эволюции несущей способности элемента представляется формулой

$$P = P_0 - \Delta P(T, T^2),$$

где P_0 — несущая способность конструктивного элемента или здания в период начала его эксплуатации (%), ΔP — уменьшение несущей способности за истекший период T (лет).

На рис. 6 представлен график изменения несущей способности отдельного конструктивного элемента и здания Центра в целом, а также представлена диаграмма $a-d$ оценки его технического состояния. Снижение ресурса здания Центра определяется величиной ΔT_1 . Разность расчетного возраста здания и фактического составляет приблизительно 30 лет.

Таким образом, для комплексной ОЖР Центра необходимо учитывать техническое состояние всех его элементов и результаты всех видов обследований: инструментального, визуального, а также данные математического моделирования. Выявленные дефекты при визуальном осмотре в совокупности с расчетны-

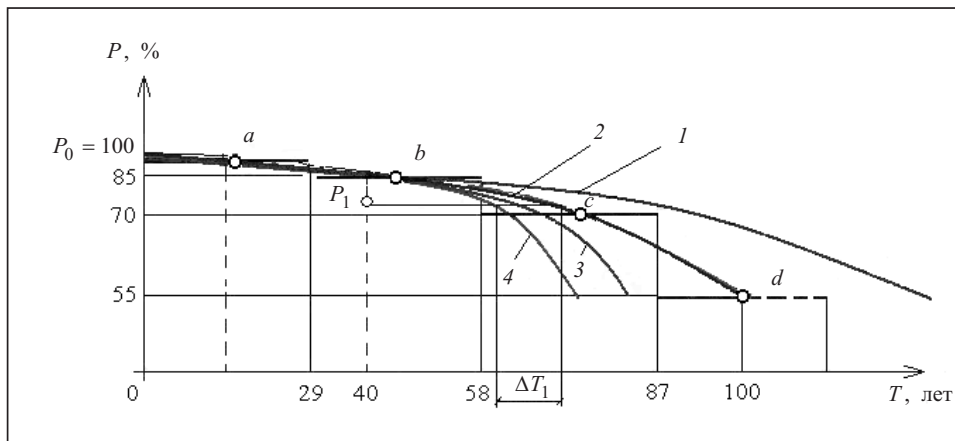


Рис. 6. Кривые изменения несущей способности конструктивного элемента и здания Центра в целом отдельного конструктивного элемента при сейсмических воздействиях (1); без сейсмических воздействий (2); без повреждений при сейсмических воздействиях (3); с повреждениями при сейсмических воздействиях (4); a — нормальное состояние здания, b — удовлетворительное состояние здания, c — непригодное для нормальной эксплуатации здание, d — возможное аварийное состояние здания; P_1 — техническое состояние здания Центра на момент исследований (2012 г.)

ми и экспериментальными данными позволяют характеризовать общее техническое состояние здания Центра как непригодного к нормальной эксплуатации уже в обозримом будущем. При нарастании внутренних дефектов в здании Центра для несущих железобетонных конструкций увеличивается риск их разрушения, что ускорит старение и значительное снижение ресурса ΔT_1 Центра.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

— Интенсивность динамического воздействия от взрывов на карьере ЮГОК на жилой фонд г. Кривой Рог оценивается в пределах 2–3(4) баллов (скорость колебаний грунта вблизи зданий составляет в пределах [0,2–0,4 см/с]) на основе исследований и полученных экспериментальных данных, проведенных сотрудниками НИИ строительных конструкций и другими экспертными организациями в 2005–2015 гг. При этом предельная масса взрывчатых веществ для осуществления взрывов в карьере ЮГОК за период наблюдений 2008–2012 гг. составляла от 490 до 652 т.

— На основе системного объединения многочисленных экспериментальных данных и результатов математического моделирования получен прогноз ухудшения технического состояния железобетонных конструкций здания Центра в условиях периодических взрывных воздействий карьера ЮГОК. Расчеты рисков разрушения несущих элементов здания Центра для всех уязвимых зон позволили спрогнозировать жизненный ресурс зданий, который уменьшился по сравнению с нормативным приблизительно на 30 лет (в 2012 г.). Определены темпы снижения жизненного ресурса Центра. Выявленные дефекты при визуальном обследовании и вибродинамических исследованиях, а также полученные расчетные характеристики (2014–2016 гг.) позволяют квалифицировать общее техническое состояние здания Центра как непригодное к нормальной эксплуатации уже в ближайшее время.

— Системная ОЖР зданий и сооружений должна учитывать техническое состояние всех его элементов и результаты инструментального и визуального видов обследований, а также данные математического моделирования.

— Экспериментально-теоретический метод ОЖР может быть успешно использован для динамической паспортизации зданий и сооружений в районах боевых действий Луганской и Донецких областей (пос. Марьянка, пос. Зайцево и др.), а также в будущем на временно оккупированной территории Украины после ее освобождения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Про єдину державну систему запобігання і реагування на надзвичайні ситуації техногенного та природного характеру: Постанова Кабінету Міністрів України від 3 серпня 1998 року № 1198.
2. Про Концепцію захисту населення і територій у разі загрози та виникнення надзвичайних ситуацій: Указ Президента від 26 березня 1999 року № 284/99.
3. Калюх Ю., Трофимчук О., Берчун Я. та ін. Настанова щодо науково-технічного моніторингу будівель і споруд: ДСТУ-Н Б В.1.2-17:2016 [Чинні від 01 квітня 2017 року]. Київ: Мінрегіонбуд, 2017. 42 с.
4. Патон Б.Є. Проблеми ресурсу конструкцій, споруд та обладнання в Україні. *Труди Всеукраїнської науково-практичної конференції «Реконструкція будівель та споруд. Досвід та проблеми»*. Київ: НДІБК, 2001. С. 18–23.
5. Правила паспортизации и оценки фактической сейсмостойкости воинских зданий и сооружений. Под общей ред. Савина С.Н. ВСП-22-01-95. Москва: МО, 1996. 43 с.
6. Мар'єнков М.Г., Калюх Ю.І., Дунін В.А., Мар'єнков А.М. Експериментально-теоретичне обґрунтування необхідності віброзахисту будинків при впливах потягів метрополітену. *Строительство, материаловедение, машиностроение*. 2016. Вып. 91. С. 77–89.
7. Farenjuk G., Kaliukh I., Farenjuk E., Kaliukh T., Berchun Y., Berchun V. Experimental and theoretical diagnostics of ferroconcrete piles base on reflection of longitudinal and transverse waves). International fib symposium “High tech concrete: Where technology and engineering meet!” (Maastricht, The Netherlands, 12–14 June, 2017), 2017. P. 1307–1317.

8. Трофимчук А.Н., Гомилко А.М., Савицкий О.А. Динамика пористоупругих насыщенных жидкостью сред. Київ: Наук. думка, 2003. 230 с.
9. Гомилко А.М., Савицкий О.А., Трофимчук А.Н. Методы суперпозиции, собственных функций и ортогональных многочленов в граничных задачах теории упругости и акустики. Київ: Наук. думка, 2016. 436 с.
10. Нормирование вибрации сооружений в СССР и за рубежом. Москва, 1990. Вып. 1.
11. Айзенберг Я.М. Развитие концепций и норм антисейсмического проектирования. Москва: ВНИИТПИ, 1977. 70 с.
12. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций ЛПА. Версия 9.0. Киев, 2002. 147 с.
13. ДБН В.1.2-2:2006. Навантаження та впливи. Норми проектування. Київ: Мінбуд України, 2006. 60 с.
14. ДБН В.1.1-12: 2014. Будівництво в сейсмічних районах України. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2014. 110 с.

Надійшла до редакції 22.11.2017

Ю.І. Калюх, В.А. Дунін, Я.О. Берчун

ЗНИЖЕННЯ ЖИТТЄВОГО РЕСУРСУ БУДІВЕЛЬ ПІД ВПЛИВОМ РЕГУЛЯРНИХ ВИБУХІВ

Анотація. Розглянуто метод експериментально-теоретичного оцінювання погіршення ресурсу залізобетонних конструкцій житлових будинків в умовах постійно діючих масових промислових вибухів потужністю від 500 до 700 т на кар'єрі Південного гірничо-збагачувального комбінату у м. Кривий Ріг (Україна). На основі оброблення численних експериментальних даних і результатів математичного моделювання отримано ймовірнісну модель прогнозу погіршення технічного стану залізобетонних конструкцій будівлі Центру дитячої та юнацької творчості «Мрія». Розрахунки ризиків руйнування тримальних елементів будівлі для її вразливих зон дозволили уточнити термін експлуатації (він зменшився в порівнянні з нормативним приблизно на 30 років).

Ключові слова: ресурс, вибух, ризик, руйнування, експеримент, обчислення.

I. Kaliukh, V. Dunin, Y. Berchun

REDUCING THE RESOURCE OF BUILDINGS BECAUSE OF REGULAR IMPACT OF LARGE-SCALE EXPLOSIONS

Abstract. The authors consider the technique of experimental and theoretical evaluation of decreasing life resource of reinforced concrete structures of residential buildings under permanent industrial large-scale explosions of the capacity of 500 to 700 tons in the quarry of PGZK in Kryvyi Rih, Ukraine. On the basis of numerous experimental data and results of mathematical modeling, a probabilistic forecast model has been obtained for deterioration of the technical condition of reinforced concrete structures of the Children and Youth Creativity Center "Mriya" located in the Ingulets district. Calculations of the risks of destruction of the load-bearing elements of the building for its vulnerable areas have made it possible to correct the operation period of the building (by decreasing it by ~30 years as compared with the normative one).

Keywords: living resource, explosion, risk, destruction, experiment, calculation.

Калюх Юрий Иванович,

доктор техн. наук, профессор, ведущий научный сотрудник Института телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины; заместитель заведующего отделом Государственного научно-исследовательского института строительных конструкций, Киев, e-mail: kalyukh2002@gmail.com.

Дунин Владимир Андреевич,

научный сотрудник Государственного научно-исследовательского института строительных конструкций, Киев, e-mail: kalyukh2002@gmail.com.

Берчун Ярослав Александрович,

аспирант Института телекоммуникаций и глобального информационного пространства НАН Украины, Киев, e-mail: berchun93@gmail.com.