

УДК 620.179.1:624.012.45

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ДЕФОРМУВАННЯ В ЗАДАЧАХ КОНТРОЛЮ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ПРОМИСЛОВИХ СПОРУД

А.П. Олійник, Б.С. Незамай, О.Р. Кучер

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.: (03422)48000,  
e-mail:ktsu@nung.edu.ua

*Розглянуті питання аналізу факторів, що впливають на технічний стан промислових споруд, проведено критичний аналіз існуючих методів неруйнівного контролю якості споруд з бетону, запропоновано математичну модель процесу деформування фундаментних плит споруд з використанням напівоберненого методу розв'язку системи рівнянь теорії пружності, наведено розрахункові формули для оцінки деформацій та напружень, проаналізовано результати тестових розрахунків, встановлено напрям подальших досліджень.*

*Ключові слова: неруйнівний контроль, бетонна споруда, фундаментна плита, математична модель, напівобернений метод.*

*Rассмотрены вопросы анализа факторов, влияющих на техническое состояние промышленных сооружений, приведен критический анализ существующих методов неразрушающего контроля качества бетонных сооружений, предложена математическая модель процесса деформирования плит сооружений с использованием полуобратного метода решений системы уравнений теории упругости, поданы расчетные формулы для оценки деформаций и напряжений, приведен анализ результатов тестовых расчетов, определены направления последующих исследований.*

*Ключевые слова: неразрушающий контроль, бетонная сооружение, фундаментная плита, математическая модель, полуобратный метод.*

*The factors, which have the influence on the industrial constructions technical state analysis questions have been considered, the critical analysis of the existiny nondestructive quality control methods for the concrete constructions has been made, the constructions had plate warping process mathematical model has been offered using the semi-inverse method to solve the elasticity theory system of equations, the formular to calculate the deformation and stresses have been presented, the test calculations results analysis has been given, the directions of perspective investigations have been defined.*

*Key words: nondestructive control, concrete construction, bed plate, mathematical model, semi-inverse method.*

Технічне діагностування конструкцій промислових споруд та будівель є процесом встановлення їх технічного стану та включає в себе пошук дефектів, вимірювання і технічний контроль діагностичних ознак [1, 2].

Аналіз аварій промислових споруд вказує на те, що їх основними причинами є наступні фактори [3, 4, 5]:

1) неякісне проектування (помилки проектування, низька достовірність гідрогеологічних та геологічних досліджень, помилкові допущення про силові експлуатаційні впливи);

2) не урахування при проектуванні природних факторів чи їх комбінацій (повені та підтоплення територій, буревії, зсуви, землетруси та цунамі і т. п.);

3) помилки будівництва (низька якість

будівельно-монтажних робіт і бетону, нижча;

4) порушення при експлуатації споруд (механічні впливи, впливи, що виникають внаслідок дії градієнта температур);

5) соціально-економічні причини (зниження рівня контролю на етапі будівництва, недотримання системи планово-попереджувальних робіт, нанесення шкоди внаслідок вибухів та пожегів).

На стадії будівництва і технічної експлуатації здійснюють геодезичний контроль вертикальних і, при необхідності, горизонтальних переміщень споруд та їх основ; відхилень від проектного положення і деформацій, що характеризують технічний стан несучих конструкцій будівель, споруд та обладнання [2, 6, 7]. Контрольованими параметрами промислових будівель і споруд,

для яких використовуються геодезичні методи та засоби вимірювань, є геометричні величини, що характеризують загальні переміщення, положення їх несучих конструкцій у просторі і між собою, деформації елементів.

Просадки, горизонтальні переміщення і деформації конструкцій будівель, споруд та обладнання виникають у зв'язку з впливом [7, 8] різних природних і виробничих факторів як на зону розміщення об'єкта, так і на сам об'єкт. Тривалість і величини деформацій об'єкта суттєво залежать від ґрунтів, а вид деформації – від конструктивних особливостей об'єкта. Під дією ваги споруди та інших вертикальних навантажень ґрунти стискаються, внаслідок чого відбуваються просадки фундаментів.

До основних методів, які дозволяють контролювати стан бетонних конструкцій, відносяться:

- радіометричний метод,
- ультразвуковий метод,
- методи місцевих руйнувань,
- методи ударного впливу.

Радіометричний метод оснований на використанні джерел ядерних гамма-випромінювань радіоактивних ізотопів [9]. Гамма-метод дозволяє досить точно визначати об'ємну вагу матеріалів конструкції в готових спорудах без відбору зразків і зважування. На основі вимірювання об'ємної ваги можуть визначатися і інші параметри, прямо або побічно пов'язані з ним: пористість, щільність, вологість (за різницею об'ємного ваги сухого і вологого матеріалу), тепло-фізичні властивості (через пористість і вологість), міцність (на основі кореляційного зв'язку об'ємної ваги з міцністю, яка існує для легких бетонів, або в комплексі з акустичними методами). Гамма-дефектоскопія заснована на зміні густини просвічуваного об'єкта за рахунок пустот, каверн, інших дефектів в матеріалі. Визначення об'ємної ваги гамма-методом ґрунтується на взаємодії гамма-випромінювання з електронами атомів досліджуваного матеріалу.

До недоліків радіометричних методів відноситься необхідність роботи із радіоактивними матеріалами, наявність залишкової наведеної радіоактивності.

Ультразвуковий метод контролю міцності споруд полягає в реєстрації швидкості проходження крізь їх несучі конструкції ультразвукових хвиль [10]. Між швидкістю проходження ультразвуку і міцністю бетону не існує однозначної залежності, однак, за певних умов, ці два показники кореляційно пов'язані. Об'єднуючим фактором є густина бетону. Зменшення густини, викликане збільшенням

відношення вода-цемент, знижує як міцність бетону при стисненні, так і швидкість проходження крізь нього імпульсів. За технікою проведення досліджень виділяють наскрізне ультразвукове прозвучування, коли давачі розміщують з двох сторін об'єкту, та поверхневе прозвучування, коли давачі розміщені з однієї сторони. Метод наскрізного ультразвукового прозвучування дозволяє контролювати міцність не лише в приповерхневих шарах бетону, а і міцність всієї конструкції. На точність вимірювання міцності при проведенні контролю можуть впливати цілий ряд факторів, а саме: тип цементу, умови тверднення, вік конструкції, вологість і температура поверхні, тип поверхні, що в загальному можна віднести до недоліків даного методу.

До методів місцевих руйнувань відносяться метод відриву із сколюванням та метод сколювання ребра конструкції [11, 12], який полягає у вимірюванні зусилля, необхідного для сколювання ділянки бетону на ребрі конструкції, або при вириванні з нього анкерного пристрою. Ці методи частково пошкоджують конструкцію.

До методів ударного впливу відносять метод ударного імпульсу, метод пружного відскоку та метод пластичної деформації [11, 12]. Прилади, що використовують метод ударного імпульсу, є невеликими по масі та простими у використанні [11]. Результати вимірювань видаються в одиницях вимірювання міцності на стиск. Після відповідних налаштувань дані прилади можна використовувати з найрізноманітнішими будівельними матеріалами. Метод пружного відскоку полягає в вимірюванні величини зворотнього відскоку ударника після контакту з поверхнею бетону. Типовим приладом для досліджень конструкцій за даним методом є склерометр Шмідта [12]. Метод пластичної деформації полягає в вимірюванні розмірів сліду, що залишається на поверхні бетону після удару. Найчастіше для таких випробувань використовують молоток Кашкарова [12].

Недоліками методів місцевих руйнувань та ударного впливу є визначення характеристик лише в локальних точках конструкції.

Основним недоліком розглянутих методів є те, що вони вимагають побудови індивідуальних градуальних залежностей за результатами досліджень стандартних взірців-кубів, виготовлених з бетону такого ж складу і віку, що і досліджувана конструкція. Безпосередньо при цьому вимірюється деяка непрямі фізична характеристика, пов'язана з міцністю

кореляційною залежністю. Для встановлення цієї залежності, а, відповідно, і для встановлення міцності конструкції попередньо необхідно встановити градувальну характеристику між міцністю та деякою непрямою характеристикою.

Слід відмітити, що трудоємність, складність та безпека робіт по складному інструментальному контролю надфундаментних несучих конструкцій в умовах діючого виробництва будуть значно більшими періодичних геодезичних робіт по контролю просадок та деформацій впродовж їх експлуатації.

Разом з тим на основі даних про деформації, одержаних з допомогою геодезичних методів контролю, можна одержати картину напружень конструкції споруди [13, 14]. При цьому для оцінки напружено-деформованого стану споруд необхідно визначити функції, що задають переміщення досліджуваного тіла. Вимірювання проводяться в декартовій системі координат. В окремих випадках, для споруд, які містять циліндричні елементи, доцільним може бути перехід до циліндричної системи координат.

На поверхні досліджуваного тіла формується сітка точок, в яких проводиться вимірювання переміщень. Для визначення компонент вектора переміщень використовуємо напівобернений метод [14]. Передбачається, що компоненти вектора переміщень задаються у такому вигляді:

$$\vec{U} = (u, v, w), \quad (1)$$

де  $u, v, w$  – переміщення по відповідних координатних напрямках, причому для функцій, що задають переміщення, приймаємо наступну форму подання:

$$\begin{cases} u(x, y) = A_1x^2 + B_1xy + C_1y^2 + D_1x + E_1y + F_1, \\ v(x, y) = A_2x^2 + B_2xy + C_2y^2 + D_2x + E_2y + F_2, \\ w(x, y) = Ax^3y^3 + Bx^2y^3 + Cxy^3 + Dy^3 + Ex^3y^2 + \\ + Gx^3y + Fx^3 + Hx^2y^2 + Ix^2y + Kx^2 + Lxy^2 + \\ + Mxy + Nx + Oy + Py^2 + R. \end{cases} \quad (2)$$

Вважатимемо, що компоненти вектора переміщень є функціями координат точок  $x$  та  $y$ , а константи у відповідних виразах мають таку розмірність, яка гарантує розмірність переміщень у метрах.

В роботі [14] приймалось, що  $u = w = 0$ , але реальні об'єкти зазнають переміщень не тільки вздовж однієї осі  $z$ , а вздовж всіх осей. Допущення, що компоненти вектора переміщень залежать лише від координат  $x$  та

$y$  обумовлені тим, що вимірювання переміщень здійснюється на зовнішній поверхні об'єкта, тобто при фіксованому значенні координати  $z$ . Необхідно розробити таку модель процесу деформування, при реалізації якої з використанням (2) виконувалися б рівняння рівноваги в декартовій системі координат. За залежностями (2) розраховуються компоненти тензора деформацій [15]:

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (3)$$

де  $u_1 = u(x, y)$ ,  $u_2 = v(x, y)$ ,  $u_3 = w(x, y)$  ;

$$\begin{cases} \epsilon_{11} = \frac{\partial u}{\partial x} = 2A_1x + B_1y + D_1, \\ \epsilon_{22} = \frac{\partial v}{\partial y} = 2C_2y + B_2x + E_2, \\ \epsilon_{33} = \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \\ \epsilon_{12} = \frac{1}{2} (B_1x + 2C_1y + E_1 + 2A_2x + B_2y + D_2), \\ \epsilon_{13} = \frac{1}{2} \left( \begin{aligned} &3Ax^2y^3 + 2Bxy^3 + Cy^3 + 3Ex^2y^2 + \\ &+ 3Gx^2y + 3Fx^2 + 2Hxy^2 + 2Ixy + \\ &+ 2Kx + Ly^2 + My + N \end{aligned} \right) \\ \epsilon_{23} = \frac{1}{2} \left( \begin{aligned} &3Ax^3y^2 + 3Bx^2y^2 + 3Cxy^2 + 3Dy^2 \\ &+ 2Ex^3y + Gx^3 + 2Hx^2y + Ix^2 + \\ &+ 2Lxy + Mx + 2Py + O \end{aligned} \right) \end{cases} \quad (4)$$

Компоненти тензора напружень обчислюються за законом Гука в довільній криволінійній системі координат [15]:

$$p_{ij} = \lambda I_1(\epsilon) g_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij}, \quad (5)$$

де  $p_{ij}$  – тензор напружень;  $g_{ij}$  – метричний тензор декартової системи координат;  $\lambda, \mu$  – параметри Ламе матеріалу;  $I_1(\epsilon)$  – перший інваріант тензора деформацій, який визначають так:

$$I_1(\epsilon) = \sum_{k,j=1}^3 \epsilon_{kj} g^{kj} = 2A_1x + B_1y + D_1 + 2C_2y + B_2x + E_2. \quad (6)$$

Підставляючи компоненти тензора деформацій (4) в (5), одержуємо формули для обчислення компонент тензора напружень:

$$\begin{cases} p_{11} = \lambda(2A_1x + B_1y + D_1 + 2C_2y + B_2x + E_2) + \\ + 2\mu(2A_1x + B_1y + D_1), \\ p_{22} = \lambda(2A_1x + B_1y + D_1 + 2C_2y + B_2x + E_2) + \\ + 2\mu(2C_2y + B_2x + E_2), \\ p_{33} = \lambda(2A_1x + B_1y + D_1 + 2C_2y + B_2x + E_2), \\ p_{12} = \mu(B_1x + 2C_1y + E_1 + 2A_2 + B_2y + D_2), \\ p_{13} = 2\mu\varepsilon_{13}, \\ p_{23} = 2\mu\varepsilon_{23}. \end{cases} \quad (7)$$

Обчислені за (7) компоненти тензора напружень підставляються в систему рівнянь в декартовій системі координат:

$$\begin{cases} \frac{\partial p_{11}}{\partial x} + \frac{\partial p_{12}}{\partial y} + \frac{\partial p_{13}}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial p_{12}}{\partial x} + \frac{\partial p_{22}}{\partial y} + \frac{\partial p_{23}}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial p_{13}}{\partial x} + \frac{\partial p_{23}}{\partial y} + \frac{\partial p_{33}}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (8)$$

При цьому одержується наступна система рівнянь:

$$\begin{cases} (2\lambda + 4\mu)A_1 + (\lambda + \mu)B_2 + 2\mu C_1 = 0, \\ 2\mu A_2 + (\lambda + \mu)B_1 + (2\lambda + 4\mu)C_2 = 0, \\ 6A_1xy^3 + 2By^3 + 6Exy^2 + 6Gxy + 6Fx + \\ + 2Hy^2 + 2Iy + 2K + 6Ax^3y + \\ + 6Bx^2y + 6Cxy + 6Dy + 2Ex^3 + \\ + 2Hx^2 + 2Lx + 2P = 0. \end{cases} \quad (9)$$

Аналіз системи (9) дозволяє одержати з використанням методу невизначених коефіцієнтів вирази та співвідношення між коефіцієнтами. Беручи до уваги допущення про те, що

$$A_1 = A_1, \quad B_2 = A_1K, \quad C_1 = A_1M, \quad (10)$$

$$A_2 = A_2, \quad B_1 = A_2K, \quad C_2 = A_2M \quad (11)$$

і підставляючи (10) та (11) в перші два рівняння системи (8), одержимо:

$$A_1 = A_1, \quad B_2 = -2A_1, \quad C_1 = -A_1, \quad (12)$$

$$A_2 = A_2, \quad B_1 = -2A_2, \quad C_2 = -A_2. \quad (13)$$

Підставляючи (12) та (13) в (2), отримаємо, що:

$$u = A_1x^2 + 2A_2xy - A_1y^2 + D_1x + E_1y + F_1, \quad (14)$$

$$v = A_2x^2 - 2A_1xy - A_2y^2 + D_2x + E_2y + F_2. \quad (15)$$

З третього рівняння системи (2) за методом невизначених коефіцієнтів одержимо, що:

$$w = C(xy^3 - x^3y) + D(y^3 - 3x^2y) + F(x^3 - 3xy^2) + K(x^2 - y^2) + Mxy + Nx + Oy + R. \quad (16)$$

Невідомі коефіцієнти в (14) ÷ (16) визначаються за методом найменших квадратів за значеннями:

$$\begin{cases} u_i = u(x_i, y_i)_{екс}, \\ v_i = v(x_i, y_i)_{екс}, \\ w_i = w(x_i, y_i)_{екс}, \end{cases} \quad (17)$$

які визначаються експериментальним шляхом, при цьому знаходиться екстремум двох функцій багатьох змінних:

$$S_1(A_1, A_2, D_1, E_1, F_1, D_2, E_2, F_2) = \sum_{i=1}^N \left[ (u_i - A_1x_i^2 - 2A_2x_iy_i + A_1y_i^2 - D_1x_i - E_1y_i - F_1)^2 + (v_i - A_2x_i^2 + 2A_1x_iy_i + A_2y_i^2 - D_2x_i - E_2y_i - F_2)^2 \right] \rightarrow \min \quad (18)$$

$$S_2(C, D, F, K, M, N, O, R) = \sum_{i=1}^N \left[ w_i - C(x_iy_i^3 - x_i^3y_i) - D(y_i^3 - 3x_i^2y_i) - F(x_i^3 - 3x_iy_i^2) - K(x_i^2 - y_i^2) - Mx_iy_i - Nx_i - Oy_i - R \right]^2 \rightarrow \min \quad (19)$$

В залежностях (18) ÷ (19)  $N$  – число точок на поверхні досліджуваного тіла, в яких проводиться вимірювання переміщень. Задачі (18) ÷ (19) мають єдиний розв'язок, оскільки вони є додатньо визначеними квадратичними функціями. Координати критичних точок вказаних функцій одержуються шляхом розв'язання двох систем лінійних алгебраїчних рівнянь з матрицями розміром  $(8 \times 8)$ .

## ВИСНОВКИ

На основі напівоберненого методу розв'язання задачі теорії пружності одержано методику визначення поля переміщень, компонентів тензорів деформацій та напружень в задачах оцінки напружено-деформованого стану фундаментних плит споруд з використанням даних про переміщення певної множини точок досліджуваного тіла. Закон зміни геометрії об'єкта будується таким чином, щоб він відповідав фізичній природі процесу – для нього виконуються основні рівняння теорії пружності – рівняння рівноваги.

Реалізація розробленої моделі проведена для модельних об'єктів – фундаментних плит споруд (газоперекачувальних агрегатів та елементів конструкції АЕС). Одержані результати засвідчують ефективність та точність моделей процесу деформування, подальші дослідження повинні бути пов'язані з оцінкою

параметрів Ламе – ( $\lambda$  та  $\mu$ ) для матеріалів, з яких виготовляються споруди, а також з оцінкою характеру та величини діючих напружень.

1. Єгоров В.І. Економіка нафтогазової та нафтохімічної промисловості. / В.І. Єгоров, Л.І. Золотнікова. – М.: "Хімія", 1982. 2. Жуков Б.Н. Руководство по геодезическому контролю сооружений и оборудования промышленных предприятий при их эксплуатации. / Б.Н. Жуков – Новосибирск: СГГА, 2004. – 376с. 3. Лащенко М.Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений. / М.Н. Лащенко. – Ленинград: Издательство литературы по строительству, 1969. – 184с. 4. Тавкин А.А. Основные причины аварий зданий и сооружений. / А.А. Тавкин. Электронный журнал "Предотвращение аварий и сооружений" : <http://www.pamag.ru/prensa/prichina-avarii> 5. Гарькин И. Н. Анализ причин обрушений промышленных зданий [Текст] / И. Н. Гарькин // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы междунар. заоч. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, март 2011 г.). / Под общ. ред. Г. Д. Ахметовой. — СПб.: Реноме, 2011. — С. 27-29. 6. Жуков Б.Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий: Монография. / Б.Н. Жуков. – Новосибирск: СГГА, 2003. – 356с. 7. Михелев Д.Ш. Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений. / Д.Ш. Михелев, И.В. Рунов, А.И. Голубцов. – М.: Недра, 1977. – 184 с. 8. Строительные нормы и правила: СНиП 2.01.07 – 85 Нагрузки и воздействия [Текст]: нормативно-технический

материал. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986 – 36с. 9. Макаров Р.А. Радиоизотопные методы измерений в строительстве. Обзор методов и приборов, основанных на использовании гамма-излучения. / Р.А. Макаров, Я.Н. Басин. – М.: Машиностроение, 1963. – 180с. 10. Ключев В.В. Неразрушающий контроль. Том 3.: Справочник. В 7-и книгах / Под ред. Ключева В.В. — М. Машиностроение, 2004. – 511с. 11. Гучкин И.С. Диагностика повреждений и восстановление эксплуатационных качеств конструкций. / И.С. Гучкин. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2001. – 176с. 12. Бойко М.Д. Диагностика повреждений и методы восстановления эксплуатационных качеств зданий. / М.Д. Бойко. – Л.: Стройиздат, 1975. — 334 с. 13. Олійник А.П. Відтворення деформованої поверхні в зоні дефекту за відомим переміщенням дискретної множини точок / [А.П. Олійник, Л.М. Заміховський, І.М. Гураль, А.З. Сенчак] // Методи та прилади контролю якості. – 2001. – №7. – С. 22-24. 14. Олійник А.П. Математичні моделі процесу квазістаціонарного деформування трубопровідних та промислових систем при зміні їх просторової конфігурації: Наукове видання. / А. П. Олійник. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 210. – 320с. 15. Седов Л.И. Механика сплошных сред. / Л.И. Седов. – М.: Наука, 1984. – Т.2. – 572с.

**Поступила в редакцію 24.11.2011 р.**

**Рекомендував до друку докт. техн. наук,  
проф. Горбійчук М. І.**