

строительства и на 30-40% уменьшается расход металла.

1. Кикин А.И., Санжаровский Р.С. Конструкции из стальных труб, заполненных бетоном // Строительство и архитектура. – 1998. – № 5. – С.35-37.

2. Клименко Ф.Е. Прочность и деформативность сталежелезобетонных изгибаемых элементов с листовой сталью на тяжелом и легком бетоне // Вестник Львовского политехнического института. – 1996. – № 11. – С. 24-28.

3. Росновский В.А. Трубобетон в мостостроении. – М.: Трансжелдориздат, 2001. – 195 с.

4. Сковорцов Н.Ф. Применение сталетрубобетона в мостостроении. – М.: Авто-трансиздат, 2002. – 98 с.

5. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. – М.: Стройиздат, 1997. – 233 с.

6. Smith F., Brown R. The Shearing Strength of Concrete, Bull. Univ. of Washington, N 106, 2001, p. 205.

7. Долженко А.А. Усадка бетона в трубчатой обойме // Бетон и железобетон. – 1990. – № 7. – С.14-17.

8. Санжаровский Р.С., Кусябгалиев С.Г. К технологии заполнения и твердения бетона в стальных трубах // Доклады к XXIV научной конференции ЛИСИ. Строительные материалы. – Л., 1994. – С.44-48.

9. Берг О.Я., Рожков А.И. Исследование неупругих деформаций и структурных изменений высокопрочного бетона при длительном действии сжимающих напряжений // Тр. ЦНИИС. Вып.70. – М., 1999. – С.57-61.

*Получено 28.10.2004*

УДК 624.01

Я.О.СЛОБОДЯН, канд. техн. наук

*Державний науково-дослідний інститут автоматизованих систем у будівництві,  
м.Київ*

## **АВТОМАТИЗАЦІЯ НЕЛІНІЙНОГО РОЗРАХУНКУ ПРОСТОРОВИХ СИСТЕМ СПОРУД В СКЛАДНИХ УМОВАХ ДЕФОРМАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

Робота присвячена створенню автоматизованого методу нелінійного розрахунку на основі теорії методу скінчених елементів та шагового методу послідовного навантаження, чисельним дослідженням нелінійного деформування складних просторових систем експериментальних споруд у всьому діапазоні силових та деформаційних навантажень у вигляді ступінчатих деформацій земної поверхні із застосуванням програмного комплексу ЛІРА [1].

Для отримання оптимальних проектних рішень сучасних складних технічних об'єктів, зведених у складних ґрунтових умовах, що складають майже 70% території України, необхідно вирішити важливу проблему автоматизації проектування на основі створення універсальних математичних моделей та загального методу нелінійного розрахунку просторових систем споруда-основа, що дозволяє проводити дослідження складних режимів силових та деформаційних навантажень у вигляді нерівномірних вертикальних і горизонтальних переміщень

земної поверхні. У рамках вирішення проблеми необхідно здійснити вибір та обґрунтування єдиного закону деформування матеріалів конструкцій і ґрунту, який використовується для адекватного моделювання та чисельного дослідження процесів нелінійного деформування систем споруда-основа у всьому діапазоні силових та деформаційних навантажень.

В області чисельних досліджень фізично нелінійних конструктивних систем О.С.Городецький вперше запропонував шаговий метод послідовних навантажень для нелінійно-пружного розрахунку тонкостінних залізобетонних конструкцій на основі стержневої апроксимації. Для стиснутого бетону використовувалась діаграма Оніщика, для розтягнутого залізобетону – залежність на основі теорії Мурашова. У наступних дослідженнях О.С.Городецький застосував метод послідовних навантажень і метод скінченних елементів (МСЕ) для чисельних досліджень роботи залізобетонних конструкцій: рам, балок-стінок, тонких плит, що згинаються, з врахуванням тріщиноутворення з використанням діаграми Оніщика для стиснутого бетону і Прандтля для розтягнутого бетону і стиснутої (розтягнутої) арматури.

Можливість застосування теорії розрахунку конструкцій на лінійно- та нелінійно-деформованій поверхні основи перемінної жорсткості вперше детально обґрунтована в дослідженнях С.М.Клепікова, у яких запропонована теорія базується на моделі перемінного коефіцієнта жорсткості поверхні основи з використанням гіперболічного закону деформування ґрунту, методу скінчених різниць та методу послідовних наближень [3].

У розвиток вищезазначених досліджень і для суттєвого уточнення існуючих розрахункових моделей особливо складних об'єктів у роботах [2, 4-7] запропоновано універсальну математичну модель з єдиним законом деформування матеріалів конструкцій та поверхні основи для нелінійного розрахунку просторових систем споруда-основа при нерівномірних вертикальних і горизонтальних переміщеннях земної поверхні на основі теорії методу скінченних елементів і методу послідовного навантаження.

Мета роботи – створення та обґрунтування достовірності автоматизованого методу нелінійного розрахунку, проведення чисельних досліджень нелінійного деформування складних просторових систем експериментальних споруд у всьому діапазоні силових і деформаційних навантажень у вигляді ступінчастих деформацій земної поверхні із застосуванням програмного комплексу ЛІРА.

Для розв'язання нелінійної задачі застосовується шаговий метод послідовного навантаження, за допомогою якого нелінійна система

рівнянь замінюється рекурентною послідовністю лінійних. Для визначення компонентів напружено-деформованого стану (НДС) лінійної системи на кожному ступіні навантаження використовується МСЕ у переміщеннях. Застосування шагового методу дозволяє простежити дійсне поведіння системи на всьому протязі навантаження, починаючи з ненавантаженого стану, включаючи стан нелінійного деформування матеріалів конструкцій і ґрунту і завершуючи процес навантаження руйнуванням системи. При цьому величина руйнівного навантаження визначається в процесі нелінійного розрахунку на основі прийнятих критеріїв руйнування по досягненню граничних деформацій або граничних напружень в елементах системи.

*Загальна схема автоматизації нелінійного розрахунку МСЕ та шаговим методом послідовного навантаження системи споруда-основа при силових і деформаційних навантаженнях*

Призначається число видів навантажень  $j \geq 1$  і число ступенів навантаження  $i^{(m)} \geq 1$  для кожного  $m$ -го виду силового та деформаційного навантаження.

Встановлюються закони навантаження і визначаються прирости вузлових навантажень для кожного  $m$ -го виду навантаження  $\Delta P^{(m,n)} = \lambda^{(m,n)} P^{(m,n)}$ . При рівномірному навантаженні коефіцієнт навантаження  $\lambda^{(m,n)} = 1/i^{(m)}$ .

Обчислюються дотичні жорсткісні характеристики на основі експонентного закону деформування матеріалів конструкцій та поверхні ґрунтової основи і відповідні коефіцієнти матриці жорсткості  $r$ -го скінченного елемента (СЕ)  $k_r^{(m,n+1)}$ .

Підсумовуючи відповідні коефіцієнти, будується загальна матриця жорсткості системи основа-споруда  $K^{(m,n+1)}$ .

Визначаються прирости ступенів свободи  $\Delta q^{(m,n+1)}$  з вирішального рівняння МСЕ системи споруда-основа на  $n+1$  ступіні  $m$ -го виду силового та деформаційного навантаження:

$$\sum_{m=1}^j \sum_{n=1}^{i^{(m)}} K^{(m,n+1)} \Delta q^{(m,n+1)} = \sum_{m=1}^j \sum_{n=1}^{i^{(m)}} \Delta P^{(m,n+1)}. \quad (1)$$

По отриманих  $\Delta q^{(m,n+1)}$  визначаються прирости компонентів НДС  $r$ -го СЕ:  $\{\Delta \varepsilon\}_r^{(m,n+1)}$ ,  $\{\Delta \sigma\}_r^{(m,n+1)}$ .

Визначаються сумарні значення компонентів НДС системи після  $n+1$  ступеня  $m$ -го виду силового та деформаційного навантаження:

$$\begin{aligned} q^{(m,n+1)} &= q^{(m,n)} + \Delta q^{(m,n+1)}; \\ \{\varepsilon\}_r^{(m,n+1)} &= \{\varepsilon\}_r^{(m,n)} + \{\Delta \varepsilon\}_r^{(m,n+1)}; \\ \{\sigma\}_r^{(m,n+1)} &= \{\sigma\}_r^{(m,n)} + \{\Delta \sigma\}_r^{(m,n+1)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Достовірність математичної моделі та методу нелінійного розрахунку систем споруда-основа обґрунтована у роботах [4, 6, 7] на основі зіставлення даних чисельних досліджень з результатами відомих вітчизняних і зарубіжних експериментальних досліджень нелінійного деформування стержнів, пластин та основних видів ґрунтів.

Можливості запропонованого загального методу чисельного дослідження розглянутого класу об'єктів ілюструються шляхом розв'язання ряду складних практично важливих задач. До їхнього числа відносяться чисельні дослідження процесів вирівнювання домкратною системою 9-поверхової експериментальної споруди на підроблюваних територіях Донбасу [3].

*Загальна характеристика експериментальної 9-поверхової споруди серії 179, запроєктованої КиївЗНІЕП за участю Донецького ПромбудНДПроекта*

Несуча просторова система споруди (рис.3) довжиною 26,4 м утворена з системи подовжніх і поперечних несучих стін, об'єднаних дисками перекриттів. Висота поверху – 2,8 м, проліт перекриттів в осях – 5,7 м. По периметру всіх стін споруди запроєктовані поверхові залізобетонні пояси, розташовані в конструкціях стінових панелей.

Наведені на рис.1 результати попередніх експериментальних [3] і чисельних досліджень деформування ґрунтів в умовах натурних випробовувань 9-поверхової споруди при силових та деформаційних навантаженнях у вигляді діаграм деформування ґрунту під фундаментною плитою ( $b=1,4$  м,  $l=1,6$  м) підтвердили збіжність результатів у всьому діапазоні навантаження при застосуванні запропонованого експонентного закону деформування ґрунту.

Для проведення основного комплексу чисельних досліджень побудовані наступні три комбінації чисельних просторових моделей експериментальної споруди при ступінчастих деформаціях земної поверх-

ні (рис.2, 3):

- модель 1 лінійна споруда – лінійна основа;
- модель 2 лінійна споруда – нелінійна основа;
- модель 3 нелінійна споруда – нелінійна основа.

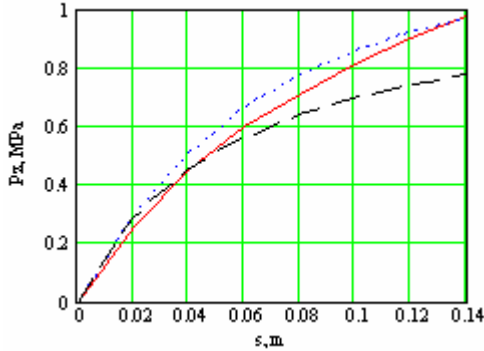


Рис.1 – Експонентна (.....), гіперболічна (—) і експериментальна (---) діаграми деформування ґрунту під фундаментною плитою експериментальної споруди.

Лінійна просторова модель 1 (рис.2) побудована на основі наступних типів суперелементів з використанням пластинчатих СЕ в умовах плоского напруженого стану і вигину: суперелемент 1 підвалу; суперелемент 2 першого поверху; суперелемент 3 типових 2, 4, 6, 8-го поверхів; суперелемент 4 типових 3, 5, 7, 9-го поверхів; суперелемент 5 технічного поверху; суперелемент 6 перекриттів поверхів. Основна схема включає модель поверхні основи та модель балкового фундаменту з використанням стержневих СЕ в умовах просторового навантаження.

Нелінійна просторова модель 2 (рис.3) побудована на основі одного типу суперелемента, що включає лінійні пластинчаті і стержневі СЕ несучої системи споруди (балкові фундаменти, зовнішні і внутрішні стіни, перекриття і покриття) і нелінійної скінченноелементної моделі поверхні основи в умовах просторового навантаження [5, 7] із застосуванням експонентного закону деформування поверхні ґрунту.

Нелінійна просторова модель 3 (рис.3) побудована на основі фізично нелінійних пластинчатих і стержневих СЕ несучої системи споруди і фізично нелінійних стержневих СЕ поверхні основи в умовах просторового навантаження [5, 7] із застосуванням єдиного експонентного закону деформування матеріалів конструкцій та поверхні ґрунту. Схема навантажень моделей 1, 2, 3 прийнята у відповідності зі схемою

натурних випробовувань споруди [3], яка складається з 11 етапів навантажень: одного силового та десяти деформаційних навантажень. Траєкторія навантажень нелінійних моделей 2, 3 прийнята рівномірною з величиною ступеня навантаження, що становить 5% від величини навантаження, тобто 20 ступенів кожного виду навантаження.

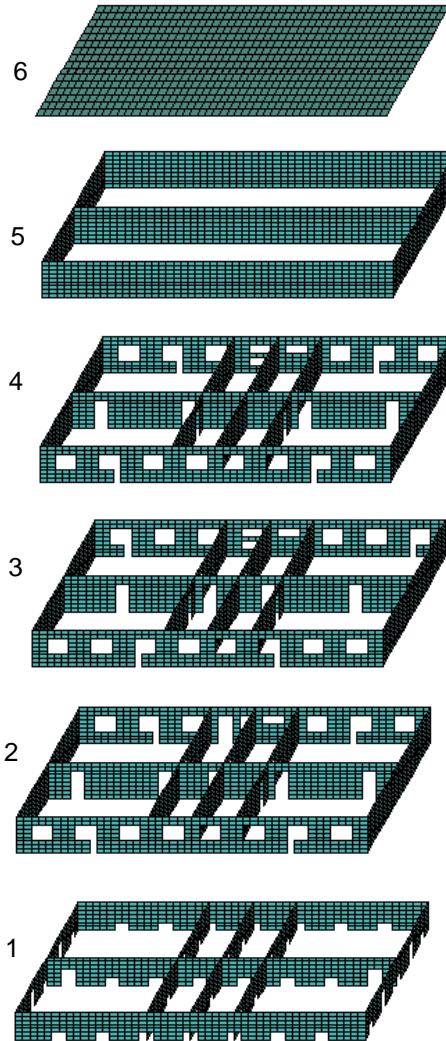


Рис.2 – Структура суперелементів

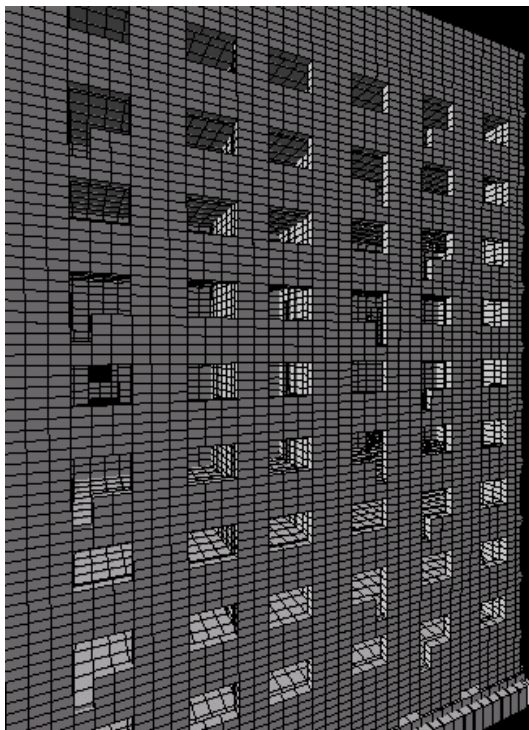


Рис.3 – 3D скінченноелементна модель споруди

Результати чисельних досліджень отримані у вигляді детальної картини розподілу максимальних  $N1$  і мінімальних  $N3$  головних напружень в просторових моделях 1, 2, 3 на всіх 11 етапах силових і деформаційних навантажень та ілюструються для найбільш навантаженої конструкції системи – внутрішньої подовжньої стіни при найбільш невідгідній комбінації навантажень: уступ довжиною  $L_u=8,5$  м, високою  $H_u=0,132$  м (рис.4-7).

Аналіз отриманих результатів свідчить про суттєву якісну і кількісну відмінність у розподілі напружень у розглянутих просторових моделях 1, 2, 3. Суттєве вирівнювання по висоті стіни і зниження максимальних по абсолютній величині головних напружень отримано в просторовій моделі 2 за рахунок застосування фізично нелінійної моделі поверхні основи (рис.6, б).

Для проведення завершального етапу чисельних досліджень процесу деформування експериментальної споруди з урахуванням фізич-

ної нелінійності конструкційних матеріалів та ґрунту при ступінчастих деформаціях земної поверхні використовується модель 3 – нелінійна споруда-нелінійна основа.

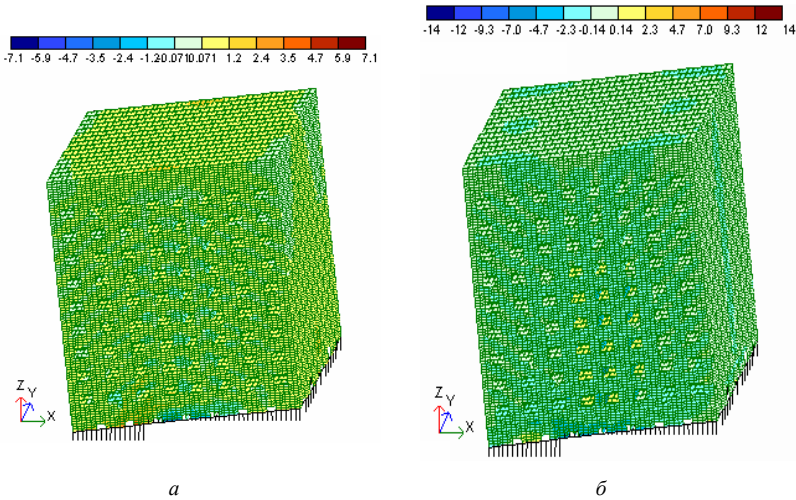


Рис. 4 – Загальний вигляд розподілу напружень N1(a), N3(б) (МПа) в моделі 1

Виявилося, що при використанні фізично нелінійної моделі поверхні основи і фізично нелінійної моделі несучої системи споруди величини головних напружень N1 і N3 практично вирівнюються по висоті споруди, а також суттєво знижуються їхні максимальні значення по абсолютній величині в порівнянні з даними лінійної моделі 1 (рис.5, 6, в). Отримані багаторазові зниження значень головних напружень дозволили забезпечити допустимий за умовами експлуатації споруди рівень розкриття тріщин при заданих параметрах деформацій земної поверхні.

Наведена на рис.7 розрахункова схема розкриття тріщин і зон їхнього розподілу по подовжній стіні практично збігається з аналогічними даними натурного випробовування споруди, що цілком підтверджує достовірність прийнятих теоретичних положень у запропонованій математичній моделі та загальному методі розрахунку просторових систем споруд з урахуванням фізичної нелінійності матеріалів і поверхні ґрунтової основи.

Таким чином, створено та експериментально обґрунтовано достовірність загального методу нелінійного розрахунку складних просторових систем основа-споруда при силових та деформаційних наванта-



женнях, що дозволив врахувати всю сукупність основних особливостей розрахункової схеми, включаючи структурну складність об'єкта, локалізований характер зовнішніх впливів, фізичну нелінійність матеріалів конструктивної системи споруди та поверхні основи.

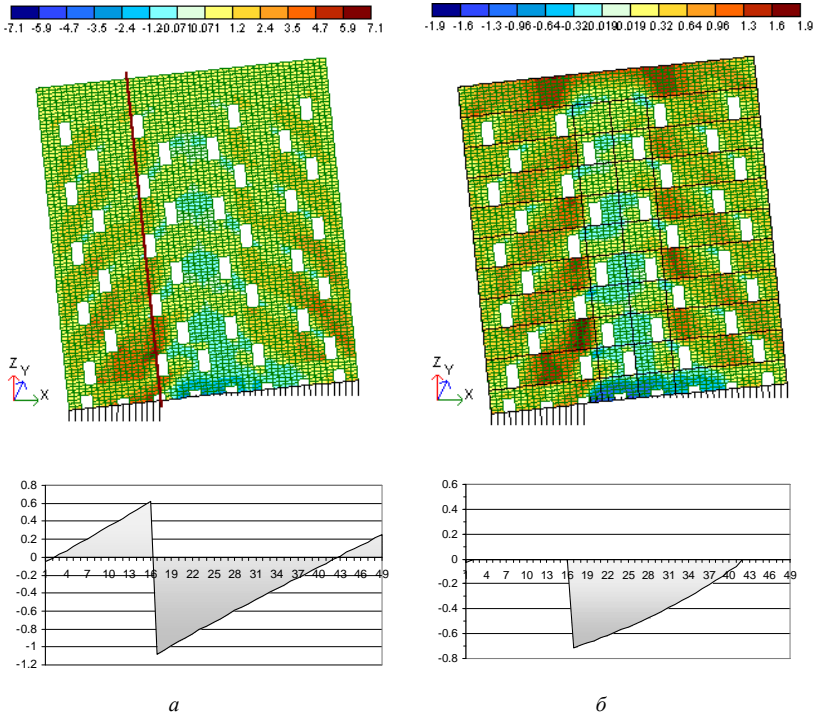


Рис. 5 – Розподіл головних напружень ( $N_1$ , МПа) внутрішньої подовжньої стіни та нормальних контактних напружень основи ( $N_z$ , МПа) моделей 1(а), 3(б).

Необхідність включення в розрахункову схему фізично нелінійних СЕ, які враховують фізичну нелінійність матеріалів конструктивної системи споруди та поверхні основи, наглядно показана на прикладах дослідження НДС розглянутої унікальної експериментальної споруди у всьому діапазоні силових та деформаційних навантажень у вигляді поперечних уступів у процесі експлуатації і вирівнювання.

Результати виконаних досліджень використані при розробці програмного комплексу ЛПА, що використовується численними вітчизняними і зарубіжними організаціями, у навчальному процесі, при розробці нормативних документів, в процесі проектування, а також для

проведення чисельних досліджень напружено-деформованого стану і автоматизованого розрахункового обґрунтування безпеки зведення, експлуатації і реконструкції особливо відповідальних технічних об'єктів в умовах екстремальних навантажень, у тому числі аварійних споруд у звичайних і складних ґрунтових умовах України і зарубіжжя.

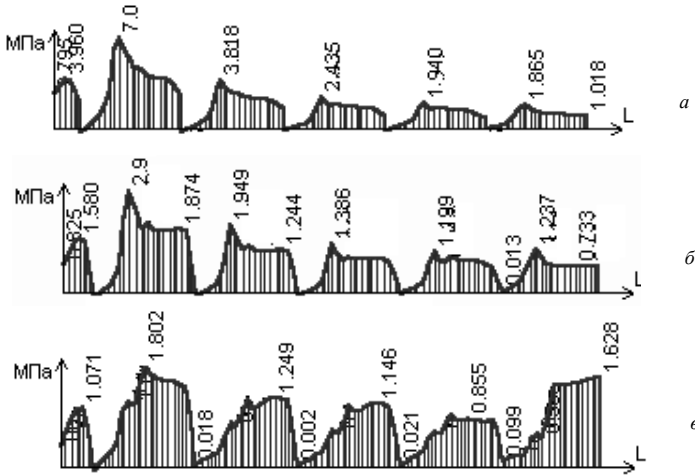


Рис.6 – Розподіл головних напружень  $N_1$  (МПа) у вертикальних перерізах внутрішньої подовжньої стіни: модель 1 (а), модель 2 (б), модель 3 (в)

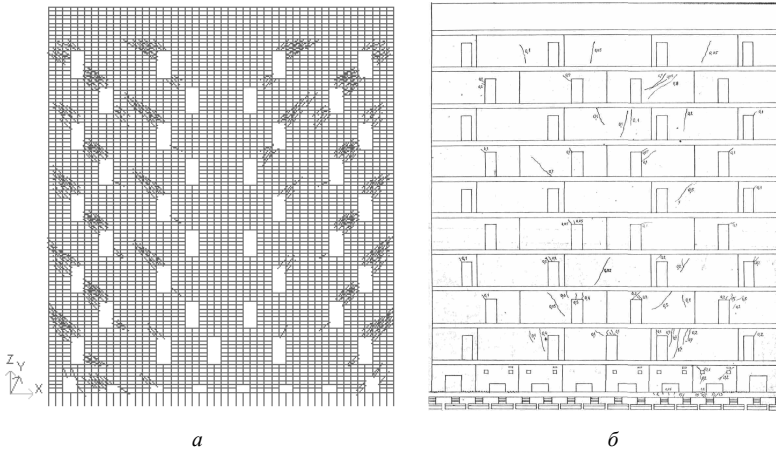


Рис.7 – Схеми розвитку тріщин у внутрішній подовжній стіні: а – чисельна модель 3; б – натурний експеримент.

1. Городецкий А.С., Слободян Я.Е. и др. / Программный комплекс ЛИРА-Windows. Теоретические основы. Т.5. – К.: НИИАСС, 1996. – 90 с.
2. Клепиков С.Н., Слободян Я.Е. Расчет зданий при многократной подработке // Строительная механика и расчет сооружений. – 1990. – №2. – С.62-65.
3. Клепиков С.Н. Расчет сооружений на деформируемом основании. – К.: НИИСК, 1996. – 200 с.
4. Слободян Я.О. Експериментальне обґрунтування чисельного розв'язання нелінійно-непружних контактних задач взаємодії споруд з нерівномірно-деформованими основами // Опір матеріалів і теорія споруд. Вип.68. – К., 2000. – С.147-155.
5. Городецкий А.С., Слободян Я.Е. Решение нелинейных задач взаимодействия сооружений с основанием с помощью ПК Лира-Windows // Проблемы тонкостенных пространственных систем. – Тбилиси: Грузинский технический университет, 2001. – С.53-57.
6. Слободян Я.О. Оцінка точності чисельного розв'язання нелінійних контактних задач взаємодії споруд з основами // Опір матеріалів і теорія споруд. Вип.70. – К., 2002. – С.136-144.
7. Баженов В.А., Слободян Я.О. Моделирование нелинейного деформирования складных пространственных систем споруд при силовых та деформаційних впливах // Опір матеріалів і теорія споруд. Вип.72. – К., 2003. – С.41-73.

*Отримано 15.11.2004*

УДК 543.22 + 66.011.001.57

Э.Б.ХОБОТОВА, д-р хим. наук, М.И.УХАНЁВА, Т.А.СЕМЕНОВИЧ,  
О.Г.МАХОВА, Н.М.ПАНТЕЛЕЕВА

*Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет*

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИЧЕСКОГО И ДИСПЕРСНОГО СОСТАВОВ ЦЕМЕНТНОЙ ПЫЛИ**

Исследуется дисперсный и химический составы пыли цементного производства. Проанализировано распределение тяжёлых металлов по фракциям пылевых частиц, установлены основные источники обогащения пыли тяжёлыми металлами. Показано присутствие радионуклидов в цементной пыли. Результаты работы могут быть использованы для разработки мероприятий по устранению негативного воздействия цементной пыли на организм человека.

Цементное производство является одним из источников выбросов в атмосферу загрязняющих веществ, включая тяжёлые металлы (ТМ). На цементное производство приходится до 15% загрязнений атмосферного воздуха ртутью [1]. Кроме ртути в атмосферу поступают Cd, Pb, Zn, Ni, Cu, Cr [2-4]. Присутствие в атмосферных выбросах ТМ обусловлено использованием в технологическом процессе пиритных огарков, доменных, металлургических шлаков, зол и нефелинового шлама. Основными источниками пыли являются вращающиеся печи обжига, мельницы помола клинкера, аппараты дробления исходных материалов, процессы упаковки и погрузки цемента. С газами, выходящими из печи обжига, поступает 70-80 % всей пыли цементного производства.