

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніцевич**

**МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТУ ВЗАЄМОДІЇ  
СИСТЕМИ «БУДІВЛЯ–ФУНДАМЕНТ–  
ОСНОВА» ЧИСЛОВИМ МЕТОДОМ  
ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

**Монографія**

Вінниця  
ВНТУ  
2010

УДК 624.15+519.642

ББК 38.58+22.193

М 79

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 2 від 01.10.2009 р.)

*Рецензенти:*

**О. І. Голоднов**, доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**О. В. Нахайчук**, доктор технічних наук, професор

**Моргун, А. С.**

М79 Моделювання ефекту взаємодії системи «будівля–фундамент–основа» числовим методом граничних елементів : монографія / А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніцевич. – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 132 с.

ISBN 978-966-641-341-6

В монографії наведено теоретичні основи дослідження взаємодії групи паль методом граничних елементів, результати числових досліджень взаємодії будівлі, фундаментних конструкцій та основи за методом скінчених елементів та методом граничних елементів. Робота основ досліджена як в лінійній, так і в нелінійній стадіях з використанням дилатансійної моделі пластичної течії. Монографія розрахована на науковий та інженерно-технічний персонал, який займається розрахунком будівельних конструкцій сучасними числовими методами, а також на студентів інженерно-будівельних спеціальностей.

**УДК 624.15+519.642**

**ББК 38.58+22.193**

**ISBN 978-966-641-341-6**

© А. Моргун, І. Меть, А. Ніцевич, 2010

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ. . . . .	5
ВСТУП . . . . .	6
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ ВЗАЄМО- ВПЛИВУ ОСНОВИ ФУНДАМЕНТУ ТА НАЗЕМНОЇ ЧАСТИНИ БУДІВЛІ. . . . .	9
Загальна характеристика існуючих програмних комплек- 1.1. сів, що дозволяють виконувати математичне моделю- вання, їх переваги та недоліки . . . . .	9
Стан питання з досліджень взаємовпливу напружено- 1.2. деформованого стану наземної та підземної частин будівель. 14	
Математичне моделювання нелінійної задачі геомехані- 1.3. ки для управління класом задач визначення напружено- деформованого стану фундаментних конструкцій. . . . .	21
1.3.1. Історія розвитку гіпотез та моделей в геомеханіці. . . . .	21
1.3.2. Основні рівняння теорії пружності та пластичності. Пло- ска задача. . . . .	29
1.3.3. Критерії міцності ґрунту. Поверхні текучості. . . . .	36
1.3.4. Деякі теорії руйнування . . . . .	37
1.3.5. Простір напружень. П-площина. Поверхня текучості. . . . .	40
1.4. Метод скінченних елементів як математична основа для числового моделювання висотних будівель . . . . .	47
1.5. Основні критерії складання розрахункових моделей ви- сотних будівель . . . . .	52
1.6. Етапи створення конструктивної схеми будівель. . . . .	59
1.7. Дослідження та моделювання напружено- деформованого стану елементів каркасу будівель . . . . .	62

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ПРОГНОЗУВАННЯ ОСІ-	
ДАННЯ БУДІВЛІ З УРАХУВАННЯМ ВЗАЄМОВПЛИВУ	
СКЛАДОВИХ ПЛИТНО-ПАЛЬОВОГО ПОЛЯ. . . . .	71
2.1. Теоретичні основи для досліджень взаємодії групи паль	
з основою при дії статичних навантажень. . . . .	71
2.2. Прогнозування поведінки плитно-пального поля висо-	
тної будівлі числовим методом граничних елементів. . .	78
Розділ 3. МЕТОДИ ВРАХУВАННЯ СУМІСНОЇ РОБОТИ НА-	
ЗЕМНОЇ ТА ПІДЗЕМНОЇ ЧАСТИН БУДІВЛІ, РОЗРОБКА АЛ-	
ГОРИТМІВ ТА ПРОГРАМНИХ КОМПЛЕКСІВ З ВИКОРИС-	
ТАННЯМ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТА	
МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ. . . . .	92
3.1. Визначальні фактори, що впливають на сумісну роботу	
наземної та підземної частини висотних будівель . . . . .	92
3.2. Вплив техногенних факторів. . . . .	93
3.3. Вплив характеру прикладання навантаження та часово-	
го фактору (деформації повзучості). . . . .	102
3.4. Вплив величини осідання будівлі на роботу системи	
«основа–фундамент–будівля» . . . . .	105
3.5. Вплив жорсткості елементів наземних конструкцій на	
роботу системи «основа–фундамент–будівля». . . . .	118
ЛІТЕРАТУРА. . . . .	121

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ГЕ	– граничний елемент
ДБН	– державні будівельні норми
ЕОМ	– електронна обчислювальна машина
МГЕ	– метод граничних елементів
МСЕ	– метод скінченних елементів
МСР	– метод скінченних різниць
НДС	– напружено-деформований стан
ПК	– програмний комплекс
РСЗ	– розрахункове сполучення зусиль
СЕ	– скінченний елемент
СЛАР	– система лінійних алгебраїчних рівнянь
СПФ	– стрічковий пальовий фундамент

## ВСТУП

Потреба великих міст України в новобудовах, яка постійно зростає, та проблеми з виділенням земельних ділянок під забудову призводять до збільшення попиту на висотні будівлі. Як наслідок, збільшується популярність монолітних конструкцій як найбільш перспективної технології зведення будівель на сьогоднішній день.

Збільшення попиту на такі конструкції також обумовлене цілою низкою позитивних властивостей. В першу чергу каркасно-монолітні конструкції на 15...20 % легші ніж збірні, відповідно зменшується кількість матеріалу, необхідного для спорудження як надземної частини, так і фундаментів, що в свою чергу призводить до зменшення загальної вартості об'єкта. Зменшенню вартості також сприяє рівна поверхня, що утворюється внаслідок бетонування. Це зменшує трудомісткість робіт пов'язаних із влаштуванням фасадів та з внутрішнім оздобленням приміщень. Терміни будівництва каркасно-монолітних споруд значно менші в порівнянні з цегляними будинками. Також однією з головних переваг каркасно-монолітних будівель є перерозподіл внутрішніх зусиль між несучими елементами каркасу, що приводить до рівномірного осідання всієї будівлі і запобігає появі тріщин. Тому можливий термін експлуатації таких будівель – до 300 років.

Збільшення поверховості будівель спонукає до пошуку шляхів вдосконалення розрахункових схем висотних будівель, з метою забезпечення надійної роботи конструкцій і разом з тим оптимального використання матеріалів [5].

До цього часу не існує достовірної універсальної методики розрахунку висотних будівель з одночасним врахуванням основи, а найчастіше наземна частина приймається в розрахунках як жорстко заземлена. Проте реальну картину напружено-деформованого стану цієї контактної задачі взаємодії 2-х блоків (I-й блок – будівля з різними конструктивними схемами та матеріалами; II-й блок – ґрунтова основа з її неоднорідністю та жорсткістю) можна отримати лише у випадку врахування сумісної роботи системи «наземна частина–фундаменти–підвалини».

Для першого блока головною характеристикою є жорсткість коробки, яка визначається розрахунковою схемою. Для другого блока головною характеристикою є стисливість, яка визначається прийнятою теорією міцності.

З огляду на актуальність питання сумісної роботи основ і фундаментів з висотною будівлею в сучасних нормативних документах

ДБН В.2.1.-10-2009 «Основи і фундаменти будівель та споруд» введене обґрунтування необхідності:

- ❖ розгляду сумісного деформування споруд з основами;
- ❖ супроводу будівництва висотних споруд моніторингом як основ і фундаментів, так і конструкцій;
- ❖ наукового супроводу зі сторони спеціалізованих організацій для накопичення достатнього досвіду проектування для оптимального вирішення геотехнічних проблем висотного будівництва і розробки спеціальної нормативної документації.

Система «будівля–основа» – чутливий індикатор змін властивостей системи при зміні НДС основи, нелінійності їх деформування, накопичених пошкоджень в конструкціях та зв'язках між ними.

Моніторинг стану системи «будівля–фундамент–основа» дозволяє прийняти своєчасні заходи, адекватні особливостям деформування системи, що виникають для відновлення її нормального функціонування [31, 96].

Розвиток будівельної галузі пов'язаний з впровадженням в будівельну практику нових технологій як прогнозного розрахунку – метод скінченних елементів, метод граничних елементів, нечітка логіка [67, 107], так і спорудження будівель. Будівля в процесі свого спорудження та існування знаходиться в постійному контакті та взаємодії з ґрунтовою основою. Тому в процесі будівництва споруди трансформуються НДС основи, впливаючи в свою чергу на споруду, а споруда і основа виступають як єдина система.

Експерименти свідчать про реакцію зміни НДС наземної частини будівлі при деформуванні ґрунтового середовища. В свою чергу виникає зворотний зв'язок від наземної частини будівлі до ґрунтового масиву. Це викликає необхідність врахування взаємодії всіх елементів системи «основа–фундамент–будівля», оскільки НДС основи і споруди, встановлені за результатами натурних спостережень суттєво відрізняються від їх розрахункових значень.

На теперішній час проблема взаємодії цього континуума в повній мірі не досліджена. Існуючі методики розрахунку не дозволяють в повній мірі враховувати взаємодію в системі «основа–фундамент–будівля», оскільки розрахункові результати відрізняються від натурних даних. Нормативні документи до появи ДБН [87, 101, 105, 109] рекомендували використовувати опосередковане врахування ґрунтових умов і спрощені конструктивні схеми будівель.

Вимоги сьогодення потребують використання в прогнозних розрахунках нових пружно-пластичних моделей ґрунту, заснованих на

асоційованому чи неасоційованому законам пластичної течії з метою прогнозування дійсної картини роботи ґрунтової основи під тисками сучасних висотних будівель [93].

Аналітичний розв'язок проблеми сумісної роботи системи «будівля–фундамент–основа» (тобто розв'язок інтегро-диференціальних залежностей стану) отримати доволі важко через багатофакторність задачі. На заміну аналітичним розв'язком прийшли числові методи. Суттєвий ефект дає реалізація в розрахункових програмних комплексах (ПК) сучасних числових методів – методу скінченних елементів та методу граничних елементів, але виникає ціла низка питань, пов'язаних з вибором розрахункової схеми і визначення її параметрів.

В роботі підземна частина будівлі, фундаменти та ґрунтова основа, основними деформаціями якої є залишкові деформації (90–95 %) моделювання МГЕ. За діючими нормативними документами проектування споруд найбільш ефективно по гранично допустимих осіданнях з перевіркою при необхідності несучої спроможності. А це потребує впровадження в практику розрахунку фундаментів на стадії проектування нелінійних математичних моделей ґрунту та необхідності врахування сумісної роботи системи «основа–фундамент–будівля».

Таким чином наземна частина висотної будівлі – залізобетонні конструкції, чітко реагує на деформації (осідання, крени) фундаментів будівлі [89]. В них проявляються непружні деформації, виникає перерозподіл напружень, з'являються тріщини, проявляються явища повзучості та релаксації. Елементи з тріщинами та елементи в яких проявляються пластичні властивості розвантажуються, з відповідним довантаженням конструкцій, що працюють в пружній стадії та конструкції, в яких релаксація зусиль не здійснюється.

Тому вирішення механізму взаємодії системи «основа–фундамент–будівля» є актуальним для сьогодення.



## **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ПИТАННЯ ВЗАЄМОВПЛИВУ ОСНОВИ, ФУНДАМЕНТУ ТА НАЗЕМНОЇ ЧАСТИНИ БУДІВЛІ**

На теперішній час проектні розрахунки споруд та ґрунтових основ проводяться в більшості випадків окремо і система «наземна частина будівлі–підземна частина» не є єдине ціле, а розглядається як набір окремих складових, взаємодія яких описується спрощено [81, 82, 86]. При визначенні НДС в елементах наземної частини споруди не враховується осідання ґрунтової основи з якою споруда знаходиться в постійному контакті. Під час спорудження будівлі змінюється епіюра контактних напружень по підшві фундаменту, що веде до перерозподілу зусиль в конструктивних наземних елементах [80, 104, 112]. Експериментально-теоретичні дослідження [9, 20, 23, 118, 112] підтверджують, що НДС будівлі і основи, встановлені за результатами натурних спостережень, суттєво різняться від їх розрахункових значень. Розходження складає 30–100 %. Таким чином, під час спорудження та експлуатації будівлі здійснюється трансформація НДС континіума основа–споруда і для отримання її кількісної картини необхідні сучасні числові методи розрахунку на ЕОМ.

### **1.1. Загальна характеристика існуючих програмних комплексів, що дозволяють виконувати математичне моделювання, їх переваги та недоліки**

Потужний сучасний метод досліджень – числовий експеримент (для деяких задач єдиноможливий) – об'єднує єдиний фізичний зміст задачі, її математичне формулювання і числовий спосіб розв'язання. Проблему прогнозування поведінки сучасної висотної споруди (системи «будівля–фундамент–основа») можна вирішити лише засобами числового моделювання з використанням швидкодійних ЕОМ та сучасних числових методів розв'язку крайових задач – методу скінченних елементів та методу граничних елементів.

Сучасні ЕОМ та інформаційні технології ліквідували бар'єр між проєктувальником та програмним забезпеченням. Зараз ЕОМ – незмінний інструмент, без якого немислима робота інженера-будівельника. В першу чергу це програми для підготовки креслень та звичайно розрахункові програмні комплекси (ПК). Сучасні ПК дають можливість глибокого аналізу конструктивних вирішень. Інколи задача проєктування поставлена недостатньо чітко і можливі зміни під час проєктування. Тому процес проєктування досить часто має ітерацій-

ний характер, при виконанні цих ітерацій вирішуються проблеми економичності, міцності та безпеки споруди.

Сучасна картина розрахункового обґрунтування конструкцій будівель, що проєктуються, їх фундаментів і основ передбачає проведення досліджень НДС повної системи «будівля–основа–фундамент» на обчислювальних комплексах, що реалізують метод скінченних елементів.

В даний час існує більше сотні програмних комплексів, в більшій або меншій мірі орієнтованих на розрахунок конструкцій [40–42, 54, 55, 95]. Всіх їх об'єднує реалізація МСЕ в переміщеннях. Це говорить про те, що ще не знайдена дієва альтернатива МСЕ в переміщеннях, хоча цей метод має деякі недоліки при розрахунках наземної частини споруди: не враховуються граничні умови по межі лінійного контакту сусідніх елементів, які відображають значення зусиль і напружень в цій же зоні, збіжність розв'язків по напруженнях значно менша, ніж по переміщеннях, навіть, у разі коли дослідника цікавлять параметри НДС в локальній зоні, у будь-якому випадку необхідно розглядати скінченно-елементну модель всієї конструкції [26, 45].

Як наслідок, ейфорія від можливостей МСЕ, характерна для перших етапів його розвитку, вже давно пройшла. Короткі відомості про сучасні програмні комплекси, в яких реалізується МСЕ представлені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Відомості про програмні комплекси

Назва програмного комплексу	Повнота БСЕ	Суперелементи	Фізична нелінійність	Геометрична нелінійність	Конструювальна система			Монтаж
					залізобетон	метал	грунт	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
STRAP		-	-	-	+	+	-	-
COSAR	3D, 2D*	-	+	-	-	-	-	-
SCAD		+	+	+	+	+	-	-
NASTRAN		+	+	+	-	-	-	-
STRU DL		+	+	+	+	+	-	-
ANSYS		+	+	+	-	-	-	+
LUSAS		-	-	-	-	-	-	-
ROBOT	3D, 2D*	-	-	-	+	+	-	-
CADFEM		-	+	+	-	-	-	-

Продовження табл. 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ADINA		-	+	-	-	-	-	-
DIANA		-	+	+	+	+	-	-
SOLVIA		-	+	+	-	-	-	-
LISA		-	+	+	-	-	-	-
COSMOS		-	+	+	-	-	-	-
STARK		+	-	-	+	+	-	-
LIRA		+	+	+	+	+	+	+
PLAXIS		-	+	-	-	-	+	-
Z-SOIL		-	+	-	-	-	+	-
CRISP		-	+	-	-	-	+	-
LS-DYNA		-	+	-	-	-	+	-
ABAQUS		-	+	-	-	-	+	-
CAM-CLAY		-	+	+	-	-	+	-

В табл. 1.1 в графах міститься така інформація:

3D – дозволяють виконувати тривимірні скінченно-елементні розрахункові схеми;

2D\* – лише двовимірні скінченно-елементні розрахункові схеми;

- ❖ назва відповідного програмного комплексу;
- ❖ «повнота бібліотеки скінченних елементів» – для універсального програмного комплексу дуже важливо, щоб клас вирішуваних задач (стержневі системи, комбіновані системи) був достатньо широким;
- ❖ «суперелементи» – реалізація суперелементного підходу [59] в даний час має велике значення, у зв'язку з тим, що, як правило, для сучасних об'єктів будівництва (багатоповерхні покриття, висотні будівлі) використовується багаторозмірна скінченно-елементна модель. Оскільки практично у всіх програмних комплексах для вирішення систем лінійних рівнянь реалізовано метод виключень Гаусса та його численні модифікації (фронтальний метод, метод Халлєцького, метод хмарочосів, стрічковий метод), кількість розв'язуваних рівнянь, як правило, обмежується 200–300 тисячами невідомих (через погіршення обумовленості матриці при збільшенні кількості невідомих), суперелементний підхід у багатьох випадках вирішує цю проблему [35];
- ❖ «фізична і геометрична нелінійність» [49] – ця характеристика програмного комплексу також дуже важлива, оскільки комп'ютерне моделювання будівельних об'єктів, що не мають аналогів, дозволяє застосування моделей максимально наближених до дійсної роботи матеріалу (тріщиноутворення і повзучість бетону, суттєва зміна геометрії під навантаженням для таких конструкцій, як вантові покриття, мембрани, тонкостінні бункери, силоси);

- ❖ «конструювальні системи: залізобетон, метал, ґрунт» – для проектування будівельних конструкцій дуже важливо, щоб програмний комплекс автоматизував не тільки статичний і динамічний розрахунок, але і операції, пов'язані з проектуванням залізобетонних і металевих конструкцій [55]. Якщо алгоритмування скінченно-елементної процедури в даний час вже стала долею окремих науковців або навіть студентів, то формалізація проектних операцій (підбір і перевірка перерізів залізобетонних і металевих елементів як мінімум, і видача робочих креслень як максимум) може бути здійснена аналітиками, що мають великий досвід проектування і знають не тільки набір національних норм, але й специфіку проектування того чи іншого регіону. Тому, якщо відомих програмних комплексів, що реалізують МСЕ достатньо (більше сотні), то число конструювальних підсистем явно обмежене [35, 61];
- ❖ «монтаж» – наявність цієї процедури в даний час викликає великий інтерес у фахівців, оскільки процес зведення складної споруди пов'язаний з багатостадійною зміною конструктивної схеми. Причому, кожна стадія зведення може бути визначальною для того чи іншого конструктивного елемента.

Для фахівця, що займається безпосередньо проектуванням будівельних об'єктів, безумовно, зручнішим у використанні буде програмний комплекс, що має конструктивні підсистеми, в яких реалізовані стандарти і норми того регіону, для якого фахівець виконує проектування [61]. Американські програми, що мають конструювальні підсистеми в основному реалізують норми США і Канади. Європейські програми, включаючи програмні комплекси STARK і LIRA, реалізують Єврокод. В програмних комплексах STARK і LIRA реалізовані також норми країн СНД, тому для цього регіону саме ці програмні комплекси є найпривабливішими.

Поява ПЕОМ в кінці 80-их змістила акценти в процесі створення і функціонування конструювальних систем [52]. У конструювальників з'явилась можливість виконувати проектування в режимі реального часу і в повній мірі використовувати переваги системи «інженер-комп'ютер».

Першим результатом у цьому напрямку було створення потужної графічної системи AutoCAD. На початку 90-их років багато спеціалістів з САПР прийшли до висновку, що графічні системи і створювані на їхній основі моделі об'єктів повинні стати ядром майбутніх конструювальних систем [61].

Таким чином можна виділити декілька основних напрямків розвитку сучасних конструювальних систем:

- ❖ графічні системи типу (AutoCAD) з потужним апаратом створення на екрані комп'ютера графічного відображення об'єкта;
- ❖ графічні системи типу (ArhiCAD, InteAR, Arhitekturnal Desktop), з потужним апаратом графічного діалогу, що дозволяє створювати графічну модель об'єкта, відображати його геометричні та візуальні характеристики, 3D – моделювання [56];
- ❖ проблемно-орієнтовані проектувальні наукоємні системи типу (ЛІРА, SCAD, NISA, ANSYS, COSMOS) з товаришським вузькопрофесійним оформленням діалогу спілкування. Ці програмні комплекси мають добре структуровану числову модель об'єкта, включають цілий ряд чисто проектних процедур. Однак такі комплекси мають достатньо обмежене коло вирішуваних задач, а тому потребують від користувача (інженера, науковця) глибоких професійних знань предметної області.

Вітчизняний ПК «ЛІРА 9.4» – це багатофункціональний програмний комплекс для розрахунку, дослідження і проектування конструкцій різного призначення.

ПК «ЛІРА 9.4» з успіхом застосовується в розрахунках об'єктів будівництва, машинобудування, мостобудування, атомної енергетики, нафтодобувної промисловості і в багатьох інших сферах, де актуальні методи будівельної механіки.

Окрім загального розрахунку моделі об'єкта на всі можливі види статичних навантажень, температурних, деформаційних і динамічних впливів (вітер з урахуванням пульсації, сейсмічні впливи), ПК ЛІРА автоматизує ряд процесів проектування: визначення розрахункових сполучень навантажень і зусиль, призначення конструктивних елементів, підбір і перевірка перерізів металевих і залізобетонних конструкцій з формуванням ескізів робочих креслень колон і балок.

ПК ЛІРА дозволяє досліджувати загальну стійкість моделей що розраховуються, перевірити міцність перерізів елементів за різними теоріями руйнувань, надає можливість проводити розрахунки з урахуванням фізичної і геометричної нелінійності, моделювати процес зведення споруди з урахуванням монтажу і демонтажу елементів. ПК ЛІРА має інформаційний зв'язок з найбільш поширеними графічними і архітектурними системами AutoCAD, ArhiCAD, Allplan) [52].

ПК Structure SCAD реалізований як інтегрована система міцнісного аналізу і проектування конструкцій на основі методу скінченних елементів і дозволяє визначити напружено-деформований стан конструкцій від статичних і динамічних впливів, а також виконати ряд функцій моделювання та проектування елементів конструкцій [36].

В основу комплексу покладена система функціональних модулів, по зв'язаних між собою єдиним інформаційним середовищем. Це середовище називається проектом і містить повну інформацію про розрахункову схему, представлену у внутрішніх форматах комплексу. В процесі формування розрахункової схеми проект наповнюється інформацією і зберігається на диску у файлі (з розширенням SPR). Імена проекту і файла задаються при створенні нової схеми. Створити проект можна і шляхом імпорту даних, що описують розрахункову схему або її частину на вхідній мові. В процесі імпорту виконується перетворення з текстового уявлення схеми у внутрішні формати, тобто в проект. Можливість переходу від текстового уявлення схеми до проекту забезпечує мовну сумісність з комплексами SCAD DOS, Міраж, ЛПА і сумісними з ними за вхідною мовою програмні комплекси [91]. Геометрія розрахункової схеми також може бути сформована і за допомогою системи AutoCAD. В цьому випадку створюється \*.dxf файл, який імпортується в SCAD. Номери вузлів і елементів розрахункової схеми, а також типи елементів в процесі імпорту призначаються автоматично.

## **1.2. Стан питання з досліджень взаємовпливу НДС наземної та підземної частини будівель**

Складність розв'язання проблеми вдосконалення складання розрахункових схем висотних каркасних будівель, полягає не лише у використанні відповідного програмного комплексу, а насамперед в прийнятті обґрунтованої фізичної моделі, що коректно описує процеси деформування матеріалу середовищ, у виборі розрахункової схеми та реалізації алгоритмів розрахунку, які забезпечують достовірність результатів розрахунку.

Ситуація ускладнюється відсутністю універсального методу чи моделі, які можна застосовувати до будь-якого середовища. Кожна постановка задачі повинна включати аналіз та особливий підхід, що вимагає від сучасного проектувальника не лише вміння правильно розробити документацію, але й мати достатні навички та знання в питаннях чисельного моделювання та механіки ґрунтів.

Врахування можливостей сучасних ЕОМ та числових методів відкриває перспективи вирішення цієї актуальної проблеми сьогодення. Отримання надійних результатів моделювання потребує використання нелінійних пружно-пластичних моделей.

Будівля в процесі свого існування знаходиться в постійному контакті та взаємодії з ґрунтовою основою, тому надійне та економічне проектне вирішення споруди може дати аналіз її напружено-

деформованого стану (НДС), отриманий при дослідженні роботи системи «будівля–основа» в цілому [65].

Прогнозування можливих наслідків дії деформацій осідання основи на конструкції будівель на етапі проектування цих об'єктів є складною багатофакторною задачею. На сьогоднішній день таке прогнозування можливе лише при орієнтації на нові технології розрахунку з застосуванням засобів числового моделювання.

Сучасне діагностування будівельних об'єктів засновано на наукових платформах, які швидко розвиваються і дозволяють удосконалити розрахункові схеми, піднімати рівень їх адекватності. Процедура моделювання поведінки будівлі реалізується на основі методу скінченних елементів (наземна частина) та методу граничних елементів (підземна частина) [66].

Розрахунок надземних конструкцій з використанням числових методів на теперішній час успішно входить в повсякденну практику проектування. Для проектувальників стало звичним використовувати традиційні підходи до моделювання роботи наземних конструкцій. Конструкції наземної частини будівель моделюються стержневими та пластинчастими (оболончастими) елементами. Як відмічено вище, велика кількість як вітчизняних, так і закордонних програм, що дозволяють розглядати конструкції, набрані з такого роду скінченних елементів із відповідної бібліотеки SE.

Дуже важливим при виконанні розрахунків є можливість розрахункових схем таких популярних програм як SCAD, ЛИРА, ROBOT вільно конвертуватись в середовище одне одного. Це ж відноситься і до креслень, виконаних в програмі AutoCAD.

Мотивацією розгляду сумісної роботи системи «будівля–основа» став той факт, що використання традиційних нормативних методик розрахунку [86, 92, 103] завжди призводить до значних помилок. Світовий та вітчизняний досвід проектування та будівництва висотних будівель свідчить, що традиційних інженерних методів розрахунку основ і фундаментів явно недостатньо. На основі даних спостережень за осіданнями і деформаціями будівель і їх узагальнення в ДБН встановлені граничні деформації основ, при яких не ушкоджуються надфундаментні конструкції.

В сучасних документах [13, 87], що регламентують проектування основ висотних будівель, рекомендуються інженерні методики розрахунку осідання фундаментів на натуральній основі, які використовують схему «пошарового підсумовування». Такий підхід теоретично менш обґрунтований ніж використання тривимірного пружнопластичного підходу на основі МСЕ. Та при використанні МСЕ виникають відомі труднощі починаючи від вибору моделі ґрунту і забезпечення її

достовірними значеннями параметрів, закінчуючи вибором розрахункової області. В цьому випадку ефективність числового прогнозу залежить від низки важко визначуваних факторів.

На теперішній час проектування несучих конструкцій будівлі чи іншої споруди базується в переважній більшості на припущенні, що споруда опирається на нестискувану основу. В дійсності ж, вага кожної споруди стискає і деформує підстильний ґрунт і в результаті цього вихідне прийняте припущення ніколи строго не задовольняється.

Якщо підшва споруди залишається плоскою, то осідання не має значення, оскільки нормальні напруження  $\sigma$  в несучій конструкції не змінюються. Коли ж під вагою споруди навантажена поверхня прогинається, підшва споруди теж стає зігнутою, це викликає деформування всієї конструкції. Додаткові  $\sigma$ , що викликані цією деформацією, не враховуються при проектуванні конструкцій. Та в багатьох випадках вони настільки значні, що можуть погіршити зовнішній вигляд будівлі, або викликати пошкодження. В результаті складності механічних властивостей ґрунтів і впливу особливостей нашарування осідання будівлі може бути передбачене лише в окремих випадках, але теоретичний аналіз явища осідання необхідний.

Досвід показав, що вертикальний (контактний) тиск може бути розраховано з достатньою точністю при припущенні, що основа будівлі є пружною та однорідною.

Після того як проєктувальник визначив розміри фундаментів таким чином, щоб нерівномірність осідання не була дуже великою і загрозовою для споруди, він має розрахувати їх на міцність. Для цього визначаються згинальні моменти і поперечні сили в тих елементах фундаменту, що передають навантаження від будівлі на ґрунт. Тиск, що діє на підшві фундаментів чи фундаментної плити на ґрунт, називається контактним тиском.

Схема «плита–жорсткий штамп» – поверхня деформованої під навантаженням основи має збігатися з підшвою штампа, тобто площиною. Хоч ця схема урахування жорсткості конструкцій будівлі в деякому сенсі є «найпростіша», вона, тим паче, в основному відображає реальність завантаження основи саме для висотних будівель, для яких плита більша 1...1,5 м забезпечує значну жорсткість конструкції в тому числі для перших поверхів. Подальше збільшення поверховості будівлі (зазвичай монолітно каркасного типу) робить схему «штампоною», робочою моделлю взаємодії.

Епюри контактних тисків по підшві жорсткого фундаменту для різних фундаментів на початковій фазі завантаження  $p_1$  та коли навантаження на фундамент сягнуло граничного  $p_{sp}$  мають різні окреслення (рис. 1.1.а, б).



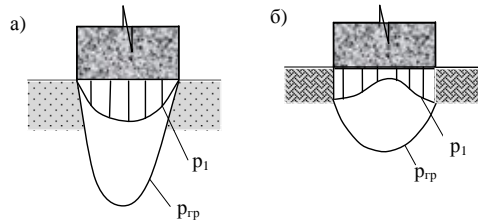


Рис. 1.1. Розподіл контактної тиску по підшві гладкого жорсткого фундаменту на основі із: а) піску без зчеплення; б) ґрунту проміжного між чисто зв'язними ґрунтами (глинами) та чисто сипучими (пісками)

Основна різниця в рівні напружень спостерігається в місцях порушення неоднорідності структури. Якщо фундамент чи плита не є абсолютно жорсткими, то розподіл реакцій ґрунту залежить від жорсткості фундаменту на згин (рис. 1.2.).

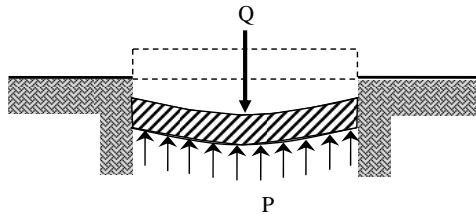


Рис. 1.2. Пружна плита на пружній основі під дією розподіленого навантаження

Із даних на рисунку 1.1 – співвідношення між деформаціями основи і контактним тиском по підшві жорсткого фундаменту є далеко не простим. Коли ж фундамент гнучкий, то це співвідношення стає ще більш складним і, навіть, грубе визначення епюри дійсного контактної тиску є надто громіздким. Та не знаючи хоча б наближеного контактної тиску, неможливо проектувати і фундаментні плити. Тому загальноприйнято визначати контактний тиск на основі спрощених допусків і компоувати похибку, викликану цими припущеннями, шляхом введення коефіцієнта запасу [47, 85].

Спрощені прийоми в старих нормативних документах [86, 105, 110] засновані на довільному і неточному припущенні, що осідання  $s$  будь-якого елемента завантаженої площі абсолютно не залежить від навантаження на примикаючі елементи. Далі приймається, на відміну від дійсності, що співвідношення

$$K = \frac{P}{S}, \quad (1.1)$$

між інтенсивністю  $P$  тиску на елемент і відповідним осіданням  $s$  буде постійним і рівним  $K$  (г/см<sup>3</sup>). На відміну від дійсного контактного тиску, який діє по підшві фундаменту, фіктивний тиск  $P$ , що задовольняє (1.1) називається реакцією пружної постелі. Коефіцієнт  $K$  називають коефіцієнтом постелі [90, 97].

Двокомпонентна модель Пастернака, (наявність другого коефіцієнта постелі, що враховує розподільну здатність ґрунту та вплив горизонтальних напружень) на жаль призводить до надмірного розвитку мульди осідання через дуже великий ступінь спрощення роботи масиву ґрунту. Спрощені моделі роботи основи не враховують нелінійності роботи ґрунту за межами розрахункового опору з використанням традиційних характеристик, що визначаються при інженерно-геологічних вишукуваннях.

Якщо можливе осідання перевищує допустимий максимум, то проект має бути перероблений.

Коли розподіл навантаження по основі є надто нерівномірним, то додаткові напруження в конструкціях, обумовлені нерівномірністю осідання, можуть бути значно понижені в результаті розподілу споруди на блоки за допомогою суцільних вертикальних швів.

При дослідженні НДС споруд виникає необхідність урахування особливостей деформування комбінованих систем, які складаються із стержнів, пластин, оболонок, особливостей конструювання вузлів, що мають різну піддатливість при різних впливах. Регулювання НДС як окремих конструкцій, так і системи в цілому відкриває можливість оптимізації параметрів будівлі.

На теперішній час реалізація прийнятого конструктивного рішення здійснюється на основі одного з вищезгаданих ПК після складання скінченно-елементної моделі будівлі та включає такі етапи:

- ❖ аналіз прийнятого конструктивного рішення;
- ❖ компоновка адекватної розрахункової схеми;
- ❖ скінченно-елементне моделювання;
- ❖ реалізація обчислень, візуалізація та аналіз результатів розрахунку.

При діагностуванні наземної частини споруди краєва задача механіки замінюється задачею знаходження мінімуму функціоналу (виразу повної потенціальної енергії роботи системи, потенціалу Лагранжа) [128]. Координатні функції, що апроксимують шукані функції  $\sigma - \epsilon$  стану будівлі, підбирались з точки зору забезпечення збіжності, точності, обумовленості розв'язків. Це найвідповідальніший етап, оскільки саме він відповідає за точність методу.

На етапі дискретизації розміри сітки скінченних елементів зазвичай приймаються на основі двох попередніх розрахунків з послідовним згущенням триангуляційної сітки. Це дає можливість отримати

уяву про точність числового розрахунку. Відносна похибка результатів розрахунку за попередніми розмірами сітки, та наступними (збільшеними в 1,5 рази) не має перевищувати 1 %. Прийнята дискретна розрахункова схема обумовлювала знаходження НДС об'єкта з розв'язку системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) високого порядку.

Корені СЛАР дають переміщення у вузлах скінченних елементів (СЕ), а по них знаходиться решта компонент НДС. В процесі компонування розрахункової схеми звертається увага на реалізацію з'єднань СЕ до вузлів системи, що мають різну жорсткість. З'єднання здійснюються за допомогою спеціальних елементів, що мають задану піддатливість в шуканому напрямку і безмежну жорсткість в решті напрямках. Методологія розрахунку наземної частини будівлі відображає основні тенденції сучасних САПР.

З огляду на складність проектного сумісного розрахунку всієї системи, врахування взаємодії будівлі з ґрунтовою основою здійснюється за допомогою коефіцієнтів постелі основи, які визначаються за спрощеними нормативними методиками. А розрахунок ґрунтової основи при взаємодії з фундаментом здійснюється без урахування реальної жорсткості самої будівлі. Вищеназвані розрахунки виконуються з використанням спеціалізованих для розв'язання різних задач обчислювальних програм (програмних комплексів) і ніяк не пов'язані між собою.

В той же час, в реальних умовах розподіл вертикальних переміщень і коефіцієнтів постелі основи по площі фундаменту будівлі далеко не однорідний та залежить від жорсткості будівлі, характеру розподілу навантаження, що передається на фундамент, інженерно-геологічних, міцнісних та деформативних характеристик ґрунтів і багатьох інших факторів.

Питанням визначення епюри коефіцієнтів постелі під підшовою фундаменту розглядається в низці робіт [58, 24].

При проектуванні будівлі основною задачею є забезпечення міцності наземних конструкцій, що безпосередньо залежить від ґрунтового масиву, параметри якого можуть змінюватись під дією різних факторів (сезонні впливи, технологія виконання підземних робіт, додаткове навантаження та ін.)

Головна особливість монолітного каркасу сучасних висотних будівель (більш жорсткої конструктивної схеми будівлі в порівнянні із збірним каркасом) – забезпечення спільної роботи усіх конструктивних елементів: колон, пілонів, діафрагм, плит перекриття, фундаментних конструкцій та перерозподіл зусиль між ними.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Алейников С. М. МГЕ в контактных задачах для упругих пространственно-неоднородных оснований / С. М. Алейников. – М. : Изд-во АСВ, 2000. – 754 с.
2. Андрухов В. М. Аналіз напружено-деформованого стану елементів каркасу багатопверхових будівель при врахуванні в розрахункових схемах характеристик підвалів / В. М. Андрухов // Збірник наукових праць ІнБТЕГП Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2006. – № 3. – С. 25–32.
3. Байков В. Н. Железобетонные конструкции / В. Н. Байков, Э. Е. Сигалов. – М. : Стройиздат, 1991. – 767 с.
4. Балсон Ф. С. Заглублённые сооружения: статическая и динамическая прочность / Ф. Балсон. – М. : Стройиздат, 1991. – 241 с.
5. Барабаш М. С. Аналіз основних проблем проектування багатифункціональних висотних будівель / М. С. Барабаш, А. В. Дзюба // Будівництво України. – 2007. – № 10. – С. 38–40.
6. Барвашов В. А. Чувствительность системы «основание–сооружение» / В. А. Барвашов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2008. – № 3. – С. 10–14.
7. Бартоломей А. А. Влияние характера нагружения на результаты расчета осадки свай и свайных фундаментов / А. А. Бартоломей, И. М. Омельчак // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2003. – № 5. – С. 2–6.
8. Бартоломей А. А. Основы расчета ленточных свайных фундаментов по предельно допустимым осадкам / А. А. Бартоломей. – М. : Стройиздат. – 1982. – 320 с.
9. Бартоломей Л. А. Прогноз осадок сооружений с учетом совместной работы основания, фундамента и надземных конструкций : автореф. дис. на соиск. учен. степ. д.т.н. : спец. 05.23.02 «Основания и фундаменты» / Бартоломей Леонид Адольфович. – Пермь, 2003. – 32 с.
10. Бахолдин Б. В. Методика контроля буронабивных свай по результатам их динамических испытаний / Б. В. Бахолдин, А. В. Драницын // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – № 1. – С. 16–21.
11. Бахолдин Б. В. Особенности расчета фундаментов из буронабивных свай / Б. В. Бахолдин, П. И. Ястребов, Е. А. Парфёнов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – № 6. – С. 12–17.
12. Берг О. Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона / О. Я. Берг. – М. : Госстройиздат, 1962. – 96 с.
13. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення ДБН пр. ДБН В.2.6. – К. : МІНРЕГІОНБУД України, 2008.

14. Бишоп А. У. Параметры прочности при сдвиге ненарушенных и перемятых образцов грунта / А. У. Бишоп ; пер. с англ. под ред. В. Н. Николаевского // Механика. Новости в зарубежной науке. Определяющие законы механики грунтов. – 1975. – № 2. – С. 7–75.
15. Бойко І. П. Вплив розташування паль на НДС захисних підпорних стінок / І. П. Бойко, В. М. Ключка // Міжвідомчий науково-технічний збірник Будівельні конструкції ; вип. 61, т. 2. – 2004.
16. Бойко І. П. Напружено-деформований стан ґрунтового масиву при прибудові нових фундаментів поблизу існуючих будинків / І. П. Бойко, В. О. Сахаров // Основи і фундаменти : Міжвідомчий науково-технічний збірник. – К. : КНУБА, вип. 28, 2004. – С. 3–10.
17. Бойко И. П. Напряженно-деформированное состояние упруго-пластического, дилатирующего основания свайных фундаментов / И. П. Бойко // Основания и фундаменты ; вып. 19. – К. : Будівельник, 1986. – С. 7–9.
18. Бойко И. П. Теоретические основы проектирования свайных фундаментов на упруго-пластическом основании / И. П. Бойко // Основания и фундаменты. – К. : Будівельник, 1985. – № 18. – С. 11–18.
19. Бондаренко В. М. Комплекс программ для расчета опертых по контуру пологих оболочек с учетом физической и геометрической нелинейности / В. М. Бондаренко, А. Л. Шагин, В. С. Шмуклер. – М. : ОФАП Госстрой СССР, 1975. – 109 с.
20. Бояндин В. С. Исследования фундаментной плиты энергетического сооружения с учетом последовательности возведения / В. С. Бояндин, А. Л. Козак // Тезисы докладов II-ой всесоюзной конференции, Йошкар-Ола, 1989. – С – 23.
21. Бреббия К. Методы граничных элементов / К. Бреббия, Ж. Телес, Л. Врубел : пер. с англ. Л. Г. Корнейчука под ред. Э. И. Григолюка. – М. : Мир, 1987. – 524 с.
22. Бугров А. К. Исследование грунтов в условиях трюхосного сжатия / А. К. Бугров. – Л. : Стройиздат, 1987. – 185 с.
23. Будівництво в сейсмічних районах України : ДБН В.1.1 – 12:2006. – [Чинний від 2007–01–02]. – К. : МНБДУД України, 2006. – 51 с.
24. Варвак П. М. Метод конечных элементов / П. М. Варвак, А. С. Городецкий, В. Г. Пискунов и др. – К. : Вища школа, 1981. – 176 с.
25. Вайнберг Д. В. Расчет пластин / Д. В. Вайнберг, Е. Д. Вайнберг. – К. : Будівельник, 1970. – 436 с.
26. Верюжский Ю. В. Численные методы потенциала в некоторых задачах прикладной механики / Ю. В. Верюжский. – К. : Вища школа, 1978. – 183 с.

27. Верюжский Ю. В. Методы анализа безопасности объекта «Укрытие» / Ю. В. Верюжский // Научно-технический сборник Проблемы чернобыльской зоны отчуждения ; вып. 6, 1998. – С. 58–70.
28. Визначення основних параметрів геологічної ситуації основи / А. С. Моргун, А. В. Ніцевич, І. М. Меть, О. Е. Тимошенко // Збірник наукових праць ІнБТЕГП Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві, 2007. – № 4. – С. 8–12.
29. Власов В. З. Тонкостенные упругие стержни / В. З. Власов. – М. : Физматгиз, 1959. – 566 с.
30. Вплив техногенного фактора замкнення ґрунтової основи на напружено-деформований стан висотної будівлі / А. С. Моргун, В. М. Андрухов, І. М. Меть, І. Ю. Яркіна // Зб. «Дороги і мости». – 2009. – К. : ДерждорНДІ. – вип. № 11. – С. 48–54
31. Гарагаш Б. А. Надежность пространственных регулируемых систем «сооружение–основание» при неравномерных деформациях основания / Б. А. Гарагаш. – Сочи : Кубанькино, 2004. – 908 с.
32. Гениев Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г. А. Гениев, В. Н. Киссюк, Г. А. Тюпин. – М. : Стройиздат, 1974. – 316 с.
33. Гольдштейн М. Н. Механические свойства грунтов / М. Н. Гольдштейн. – М. : Стройиздат, 1971. – 368 с.
34. Горбунов-Посадов М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов, Т. А. Маликова, В. И. Соломин. – М. : Стройиздат, 1984. – 679 с.
35. Городецкий А. С. Информационные технологии расчёта и проектирования строительных конструкций : учебное пособие / Городецкий А. С., Шмуклер В. С., Бондарев А. В. – Харьков : НТУ ХПИ, 2003. – 889 с.
36. Городецкий А. С. Компьютерные модели конструкций / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров. – К. : Факт, 2005. – 344 с.
37. Городецкий А. С. К расчету тонкостенных железобетонных конструкций в неупругой стадии / А. С. Городецкий // Труды НИИСК. – 1965. – Вып. 6. – С. 86–93.
38. Городецкий А. С. Расчет железобетонных плит с учетом образования трещин методом конечных элементов / Прикладные проблемы прочности и пластичности / А. С. Городецкий, В. С. Здоренко. – Горький : Изд. ГГУ, 1976. – С. 48–52.
39. Городецкий А. С. Сходимость метода конечных элементов для задач нелинейной теории упругости / Городецкий А. С., Евзеров И. Д., Карпиловский В. С. – К. : Деп. в УкрНИИНТИ, 1980. – № 2194. – 9 с.

40. Готман Н. З. Определение параметров свайного поля из забивных свай / Н. З. Готман // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2003. – № 2. – С. 2–6.
41. Григорян А. А. О безопасности строительства на глинистых грунтах по первому предельному состоянию / А. А. Григорян // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2006. – № 5. – С. 20–25.
42. Григорян А. А. О некоторых особенностях проектирования свайных фундаментов в грунтовых условиях II типа по просадочности / А. А. Григорян // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2005. – № 1. – С. 21–25.
43. Дарков А. В. Строительная механика / А. В. Дарков, Н. Н. Шапошников. – М. : Высшая школа, 1986. – 607 с.
44. Динамический расчет зданий и сооружений (Справочник проектировщика) / Под ред. Б. Г. Коренева и И. М. Рабиновича. – М. : Стройиздат, 1984. – 303 с.
45. Евзеров И. Д. Оценки погрешности несовместимости конечных элементов плиты / И. Д. Евзеров. – К. : 1979. – 10 с. – (Дец. В УКРНИИНТИ, № 1467).
46. Евзеров И. Д. Сходимость прямолинейных конечных элементов при расчете криволинейных стержней / И. Д. Евзеров, В. С. Здоренко // Сопроотивление материалов и теория сооружений. – К. : Будивельник, 1983. – Вып. 42. – С. 99–101.
47. Жемочкин Б. М. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / Б. М. Жемочкин, А. П. Синицин. – М. : Стройиздат, 1962. – 239 с.
48. Зарецкий Ю. К. Вязко-пластичность грунтов и расчеты сооружений / Ю. К. Зарецкий. – М. : Стройиздат, 1988. – 320 с.
49. Зенкевич О. К. Метод конечных элементов в технике / О. К. Зенкевич. – М. : МИР, 1971. – 542 с.
50. Зоценко М. Л. Підсилення основ і фундаментів при реконструкції будівель / Зоценко М. Л., Винников Ю. Л., Борт О. В. // Бетон и железобетон в Украине. – К. : 2006. – № 1. – С. 2–8.
51. Ильющин А. А. Труды (1946–1966). Т. 2. Пластичность [сост. Е. А. Ильющина, М. Р. Короткина]. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 480 с.
52. Информатика. Информационные технологии в строительстве. Системы автоматизированого проектирования : учеб. для студ. высших уч. зав. / В. А. Баженов, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер, О. В. Шишов. – К. : Каравела, 2004. – 360 с.
53. Карпенко Н. И. Теория деформирования железобетона с трещинами / Н. И. Карпенко. – М. : Стройиздат, 1976. – 281 с.

54. Карпиловский В. С. Конструирование несовместимых конечных элементов / В. С. Карпиловский. – К. : 1980. 50 с. (Деп. В УкрНИИНТИ, № 2153).

55. Компьютерные технологии проектирования железобетонных конструкций. Учебное пособие / Ю. В. Верюжский, В. И. Колчунов, М. С. Барабаш, Ю. В. Гензерский. – К. : изд-во НАУ, 2006. – 808 с.

56. Криксунов Э. З. О расчетных моделях сооружений и возможностях их анализа. CAD Master [Электронный ресурс] / Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер. – 2000. – № 3. – С 38–43. – Режим доступа до журналу. : [http://csf.ru/file/tpxiMsktagvovrvp7790842/cm\\_03\\_rasch\\_modeli.pdf](http://csf.ru/file/tpxiMsktagvovrvp7790842/cm_03_rasch_modeli.pdf).

57. Крыжановский Ф. Л. Использование закона Кулона в решении задач предельного состояния оснований / Ф. Л. Крыжановский, Ю. И. Харин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1984. – № 7. – С. 24–27.

58. Клепиков С. Н. Расчет конструкций на упругом основании / С. Н. Клепиков. – К. : Будівельник, 1967. – 285 с.

59. Коротеева Л. И. Универсальный полилинейный элемент на основе тензорных рядов / Коротеева Л. И., Сахаров А. С., Сахаров В. А. ; НТУ КПИ Деп. в ГНТБ Украины. – К. : 2000. – 11 с.

60. Мангушев Р. А. Плитно-свайный фундамент для здания повышенной этажности / Р. А. Мангушев, А. Б. Фадеев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2008. – № 1. – С. 15–19.

61. Метод конечных элементов: теория и численная реализация. Программный комплекс «ЛПРА-Windows» / А. С. Городецкий, И. Д. Евзеров, Е. Б. Стрелец-Стрелецкий и др. – К. : ФАКТ, 1997. – 138 с.

62. Методические рекомендации по уточненному расчету железобетонных элементов с учетом полной диаграммы сжатия бетона / А. Н. Бамбура, В. Я. Бачинський, Н. В. Журавлева, И. Н. Пешкова. – К. : НИИСК Госстроя СССР 1987. – 25 с.

63. Михлин С. Г. Вариационные методы математической физики / С. Г. Михлин. – М. : Наука, 1970. – 512 с.

64. Моделивання за МГЕ процесу підсилення стрічкового фундаменту палями / А. С. Моргун, І. В. Маєвська, А. В. Нічевич, Н. В. Блащук // Вісник ВПІ. – 2008. – № 3. – С 4–8.

65. Моргун А. С. Врахування перерозподілу зусиль під час дослідження напружено-деформованого стану сумісної роботи системи «основа–фундамент–будівля» [Електронний ресурс] / А. С. Моргун, І. М. Меть // Наукові праці ВНТУ. – 2009. – № 2. – С. 2–5. – Режим доступу до журн.: [http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2009\\_2\\_ua/2009-2.files/uk/09asmbfc\\_ua.pdf](http://www.nbuuv.gov.ua/e-journals/VNTU/2009_2_ua/2009-2.files/uk/09asmbfc_ua.pdf)

66. Моргун А. С. Діагностування напружено-деформованого стану каркасної монолітної будівлі за методами скінчених та граничних



елементів / А. С. Моргун, В. О. Попов, І. М. Меть // Вісник ВПІ. – 2007. – № 6. – С 3–7.

67. Моргун А. С. Ідентифікація несучої здатності паль методами нечіткої логіки й методом граничних елементів [Електронний ресурс] / Моргун А. С., Кательніков Д. І., Моргун І. А. // Наукові праці ВНТУ. – 2008. – № 2. – С. 1–7. – Режим доступу до журн. : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2008-2/2008-2.files/uk/08masm.be.uk>

68. Моргун А. С. Комп'ютерні технології розрахунку фундаментних конструкцій на основі методу граничних елементів : монографія / А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніцевич. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 162 с.

69. Моргун А. С. Комп'ютерна технологія розрахунку паль пальового поля висотних будівель із збільшеним кроком паль / Моргун А. С., Ніцевич А. В., Моргун І. А. // Вісник ВПІ. – 2007. – № 5. – С. 41–44.

70. Моргун А. С. Метод граничних елементів в розрахунках паль : монографія / А. С. Моргун. – Вінниця : Універсум–Вінниця, 2000. – 130 с.

71. Моргун А. С. Моделювання дилатансійного середовища ґрунту системи «паль–основа» за МГЕ / А. С. Моргун // Основи і фундаменти. – К. : КНУБА, випуск 27, 2002. – С. 84–89.

72. Моргун А. С. Пластична задача механіки руйнувань ґрунтової основи будівель за методом граничних елементів / Моргун А. С., Меть І. М., Ніцевич А. В. // Збірник НІИСК № 71 книга І. – К. : 2008. – С. 88–92.

73. Моргун А. С. Прогнозування взаємодії паль пальового поля будівлі за методом граничних елементів / Моргун А. С., Ніцевич А. В., Меть І. М. // Тези студентських доповідей, рекомендованих до опублікування оргкомітетом XXXVI науково-технічної конференції. – Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 2007. – С. 83.

74. Моргун А. С. Прогнозування взаємодії паль пальового поля будівлі за методом граничних елементів / Моргун А. С., Ніцевич А. В., Моргун І. А. // Збірник наукових праць ІнБТЕГП «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві», 2007. – № 4. – С. 23 – 28.

75. Моргун А. С. Прогнозування впливу води на напружено-деформований стан лесової основи пальових фундаментів / А. С. Моргун, І. А. Моргун // Вісник ВПІ. – 2007. – № 3. – С. 20–23.

76. Моргун А. С. Формування матриці впливу методу граничних елементів при врахуванні дії вертикальних і горизонтальних напружень [Електронний ресурс] / Моргун А. С., Ніцевич А. В., Меть І. М. // Наукові праці ВНТУ. – 2007. – № 1. – С. 1–5. – Режим доступу до журн. : <http://www.nbu.gov.ua/e-journals/VNTU/2007-1/ukr/07masorp>.

77. Моргун А. С. Числове моделювання за МСЕ та МГЕ сумісної роботи наземної та підземної частин будівлі / А. С. Моргун, І. М. Меть // 36. КНУБА. – 2009. – С. 56–63.

78. Миронов В. А. Прочность и деформируемость грунтов при сложном напряженном состоянии / Миронов В. А., Софьин О. Е., Гудий А. Н. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – № 4. – С. 5–9.

79. Навантаження і впливи : ДБН В 1.2-2:2006. – [Чинний від 2007–01–01]. – К. : МІНБУД України, 2006. – 60 с.

80. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / В. Н. Гордеев, А. И. Лантух-Лященко, В. А. Гашинский и др. – К. : АСВ, 2008. – 482 с.

81. Назаров Ю. П. Совершенствование программных средств для расчета сооружений на динамические воздействия / Ю. П. Назаров // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2002. – № 1. – С. 11–12.

82. Немчинов Ю. І. Метод просторових скінченних елементів; із застосуванням до розрахунку будівель та споруд : монографія / Ю. І. Немчинов. – К. : НДІБК, 1995. – 368 с.

83. Николаевский В. Н. Современные проблемы механики грунтов / В. Н. Николаевский // Определяющие законы механики грунтов. – М. : Стройиздат, 1975. – С. 210–227.

84. Одэн Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред / Дж. Одэн. – М. : Мир, 1976. – 464 с.

85. Оксанович Л. В. Невидимый конфликт / Л. В. Оксанович. – М. : Стройиздат, 1981. – 191 с.

86. Основания зданий и сооружений : СНиП 2.02.01-83. – [Действителен с 1985. 01. 01]. – М. : Стройиздат, 1984. – 49 с.

87. Основи і фундаменти будівель та споруд : ДБН В.2.1–10–2009. – [Чинний від 2009–07–01]. – К.: МІНБУД України, 2009. – 199 с.

88. Орехов В. В. Учет конструкции здания при расчетах осадки фундамента и коэффициентов постели основания / В. В. Орехов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – № 7. – С. 2–4.

89. Павлов Д. В. Исследование релаксации сдвиговых напряжений в песках / Д. В. Павлов, В. М. Радионов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – № 3. – С. 7–10.

90. Пастернак П. Л. Основы нового метода расчета фундаментов на упругом основании при помощи двух коэффициентов постели / П. Л. Пастернак. – М. : Госстройиздат, 1954. – 268 с.

91. Перельмутер А. В. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – К. : Сталь, 2002. – 600 с.

92. Перельмутер А. В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций : 2-е изд. перераб. и доп. / А. В. Перельмутер. – К. : Изд-во УкрНИИпроектстальконструкция, 2000. – 216 с.

93. Пилягин А. В. Проектирование оснований и фундаментов зданий и сооружений : уч. пособие / А. В. Пилягин. – М. : АСВ, 2006. – 248 с.

94. ПК ЛИРА, версия 9.0. Программный комплекс для расчета и проектирования конструкций. Справочно-теоретическое пособие под ред. Академика АИН Украины А. С. Городецкого. – К. – М. : 2003. – 464 с.

95. «ПК-ЛИРА» – программный комплекс для расчета и проектирования конструкций на персональных компьютерах / А. С. Городецкий, А. И. Олин, Л. Г. Батрак и др. – К. : НИИАСС, 1988. – 105 с.

96. Попов Н. Н. Расчет конструкций на динамические специальные нагрузки / Н. Н. Попов, Б. С. Расторгуев, А. В. Забегаев. – М. : Высшая школа, 1992. – 319 с.

97. Применение метода конечных элементов к расчету конструкций на упругом основании с двумя коэффициентами постели / В. С. Здоренко, А. С. Городецкий, В. И. Елсукова, В. И. Сливкер // Соппротивление материалов и теория сооружений : вып № 27. – К. : Будівельник, 1975. – С. 180–192.

98. Проблеми моделювання поведінки дилатансійних основ за методом граничних елементів / А. С. Моргун, А. В. Ніцевич, І. М. Меть, І. А. Моргун // Збірник наукових праць «Дороги і мости», Міжнародна НТК «Проблеми теорії споруд, проектування будівництва та експлуатації мостів», 21–23 червня 2007р. – К. – С. 32–39.

99. Проблеми ресурсу фундаментних конструкцій при реконструкції будівель / А. С. Моргун, А. В. Ніцевич, І. М. Меть, І. А. Моргун // Збірник наукових праць ІнБТЕГП «Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві», 2006. – № 3. – С. 28–35.

100. Прогини і переміщення : ДСТУ Б В.1.2 – 3:2006. – [Чинний від 2007–01–01]. – К. : МІНБУД України, 2006. – 13 с.

101. Проектирование железобетонных конструкций : справочное пособие / Бачинский В. Я., Полищук В. П., Харченко А. В., Руденко И. В. Под ред. А. Б. Гольшева. – К. : Будівельник, 1990. – 544 с.

102. Пушилин А. Н. Метод расчета усилий в конструкциях зданий при деформировании основания из-за проходки подземной выра-

ботки / Пушилин А. Н., Фаворов А. В., Шейнин В. И. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – № 3. – С. 2–7.

103. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона : проблемы, опыт, возможные решения и рекомендации, компьютерные модели, информационные технологии / А. С. Городецкий, Л. Г. Батрак, Д. А. Городецкий [и др.] – К. : Факт, 2004. – 106 с.

104. Расчет осадок зданий и сооружений на слабых глинистых грунтах с учетом деформаций сдвига во времени / М. А. Лучкин, В. М. Улицкий, А. Г. Шаликин, К. Г. Шаликин // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – № 2. – С. 13–17.

105. Руководство по проектированию свайных фундаментов. – М. : Стройиздат, 1980. – 150 с.

106. Розин Л. А. Задачи теории упругости и численные методы их решения / Л. А. Розин. – Санкт-Петербург : СПбГТУ, 1998. – 530 с.

107. Ротштейн А. П. Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткие множества, нейронные сети, генетические алгоритмы / А. П. Ротштейн. – Винница : Универсум–Винница, 1999. – 320 с.

108. Сахаров В. О. Моделивання багатопверхового будинку на нелінійній основі в умовах прибудови / В. О. Сахаров // Світ геотехніки. – 2006. – № 4. – С. 25–28.

109. Свайные фундаменты : СНиП 2.02.03 – 85 [Действителен с 1987–01–01]. – М. : Стройиздат, 1985. – 92 с.

110. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерлинд. – М. : Мир, 1979. – 392 с.

111. Седов Л. И. Механика сплошной среды / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1970. – 540 с.

112. Соломин В. И. Методы расчета и оптимальное проектирование железобетонных фундаментных конструкций / В. И. Соломин, В. Б. Шматков. – М. : Стройиздат, 1986. – 208 с.

113. Стасюк М. І. Залізобетонні конструкції. Ч.1. Основи розрахунку залізобетонних конструкцій за граничними станами : навч. посібник / М. І. Стасюк. – К. : ІЗМН, 1997. – 272 с.

114. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс. – М. : Мир, 1977. – 349 с.

115. Тер-Мартиросян З. Г. Взаимодействие свайного фундамента с грунтом / Тер-Мартиросян З. Г., Нгуен З. Н., Динь А. Н. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – № 2. – С. 2–7.

116. Тихий М. Расчет железобетонных рамных конструкций в пластической стадии. Перераспределение усилий / М. Тихий, Й. Ракосник ; пер. с чешск. – М. : Стройиздат, 1976. – 198 с.

117. Трофимчук А. Н. Надёжность систем сооружения – грунтовое основание в сложных инженерно-геологических условиях / Трофимчук А. Н., Черный В. Г., Черный Г. И. – К. : Полиграфконсалтинг, 2006. – 248 с.

118. Улицкий В. М. Геотехническое сопровождение реконструкции городов / В. М. Улицкий, В. Г. Шашкин. – М. : ABC, 1999. – 327 с.

119. Федоровский В. Г. Предельное давление на ряд ленточных фундаментов и эффект «непродавливания» / В. Г. Федоровский // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2006. – № 3. – С. 9–14.

120. Федоровский В. Г. Прогноз осадки фундаментов мелкого заложения и выбор модели основания для расчета плит / В. Г. Федоровский, С. Г. Безволев // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2000. – № 4. – С. 23–25.

121. Феодосьев В. И. Применение шагового метода к анализу устойчивости сжатого стержня / В. И. Феодосьев // Прикладная математика, 1963. – № 2. – С. 265–274.

122. Хазин В. И. Экспериментальные исследования зависимости несущей способности пирамидальных свай от угла коничности / В. И. Хазин // ОиФ. – К. : Будівельник, 1972. – Выпуск 5. – С. 124–128.

123. Хоу В. К. Основы инженерного грунтоведения / В. К. Хоу. – М. : Стройиздат, 1966. – 460 с.

124. Шапиро Д. М. Упруго-пластичный анализ несущей способности оснований реконструируемых объектов методом конечных элементов / Д. М. Шапиро, Н. Н. Мельничук // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2007. – № 2. – С. 18–21.

125. Шмуклер В. С. Метод интегральных градиентов в оптимизационных задачах САПР / В. С. Шмуклер // Системы автоматизированного проектирования. – К. : Будівельник, 1989. – Вып. 6. – С. 56–62.

126. Шкодін М. М. Програмування та чисельні методи в розрахунках інженерних споруд : навчальний посібник / Шкодін М. М., Моргун А. І., Моргун А. С. – К. : НМК ВО, 1992. – 208 с.

127. Янко К. О. До зміни напружено-деформованого стану лесової основи пального фундаменту, внаслідок її замощення / Янко К. О., Школяр С. П., Муха В. А. // Збірник наукових праць Полтавського національного технічного університету, Серія: Галузеве машинобудування, будівництво, Вип.12. – Полтава : ПНТУ, 2003. – С. 277–280.

128. Abovskiy N. P. Energy principle and its application for the creation of controlled structures / N. P. Abovskiy // Spatial structures in new and renovation projects of Building and construction. Proceeding international congress ICSS – 98, June 22–26, Moscow. Russia, 1998. – P. 307–311.

129. Drucker D. C. Soil mechanics and plastic analysis or limit design. Quarterly Applied Mathematics / D. C. Drucker, W. Prager. – 1952. – № 2. – P. 157–165.
130. Drucker D. C. Soil mechanics and work-hardening theories of plasticity / D. C. Drucker, R. E. Gibson, D. S. Henkel // Trans. of the Amer. Soc. of Civil Eng. – 1956 – № 121. – P. 338–346.
131. Robinson J. An evaluation of skew sensitivity of thirty three plate bending elements in nineteen FEM systems / J. Robinson // Nuclear Engineering and Design, Vol. 90, Issue 1, 3 November 1985. – P. 67–85.
132. Timoshenko S. P. Theory of Structures / S. P. Timoshenko, D. H. Young. – New York, 1965. – P. 330–331.
133. Timoshenko S. P. Theory of Elastic Stability / S. P. Timoshenko, J. M. Gere. – 2nd ed., McGraw-Hill Book co., New York, 1961. – P. 45.
134. Melan E. Der Spannungszustand der durch eine Einzelkraft im innern beanspruchten Halbscheibe / E. Melan // Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 1932. – № 12. – P. 343–346.
135. Mindlin R. D. Force at a point in the interior of a semi-infinite solid / R. D. Mindlin // Physics, 1936. – № 7. – P. 195–202.
136. Owen D. Finite elements in plasticity: Theory and Practice / D. Owen, E. Hinton. – Svansia, U. K., 1984. – 250 p.

*Наукове видання*

**Моргун Алла Серафимівна  
Меть Іван Миколайович  
Ніцевич Андрій Віталійович**

**МОДЕЛЮВАННЯ ЕФЕКТУ ВЗАЄМОДІЇ СИСТЕМИ  
«БУДІВЛЯ–ФУНДАМЕНТ–ОСНОВА» ЧИСЛОВИМ  
МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

Монографія

Редактор С. Малішевська  
Оригінал-макет підготовлено А. Моргун

Підписано до друку 28.01.2010 р.  
Формат 29,7×42¼ Папір офсетний.  
Гарнітура Times New Roman.  
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 7,62  
Наклад 100 прим. Зам № 2010-021

Вінницький національний технічний університет,  
КІВЦ ВНТУ,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-85-32  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.

Віддруковано у Вінницькому національному технічному університеті,  
в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі,  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Тел. (0432) 59-81-59  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.