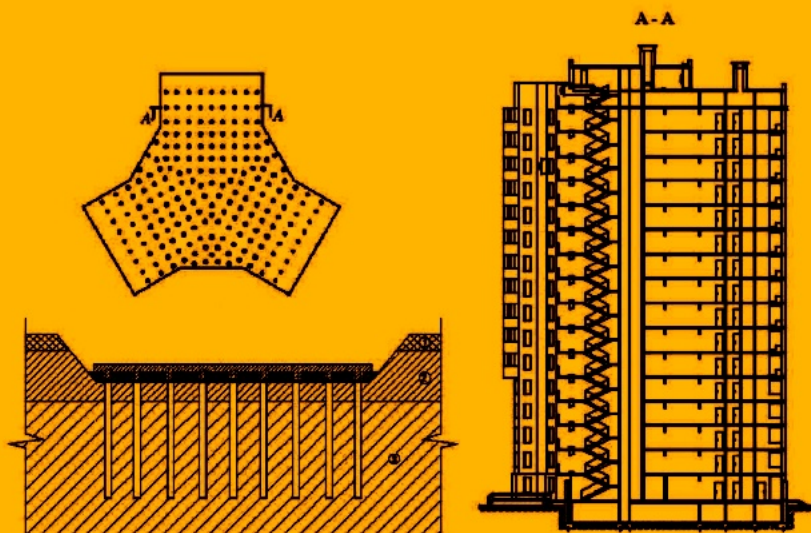


А. С. Моргун, І. М. Меть, А. В. Ніцевич

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



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 континіума 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 BCE	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 Халлецького, 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 удосконалювати 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 σ в несучій конструкції не змінюються. Коли ж під вагою споруди навантажена поверхня прогинається, підшва споруди теж стає зігнутою, це викликає деформування всієї конструкції. Додаткові σ , 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 «штампною», 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).

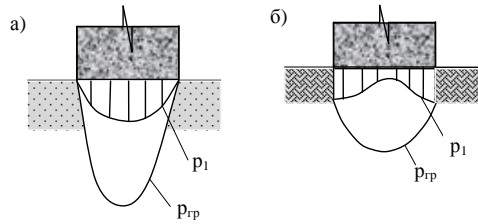


Рис. 1.1. Розподіл контактної тиску по підшві гладкого жорсткого фундаменту на основі із: а) піску без зчеплення; б) ґрунту проміжного між чисто зв'язними ґрунтами (глинами) та чисто сипучими (пісками)

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.).

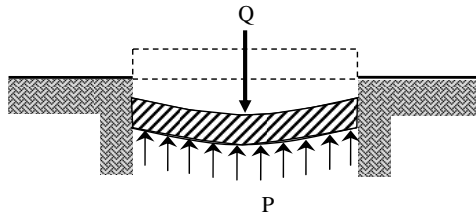


Рис. 1.2. Пружна плита на пружній основі під дією розподіленого навантаження

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 komponувати 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 навантаженої 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/см³). 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.

Вірне використання цих можливостей дозволяє значно поліпшити міцнісні властивості каркасу з одночасним зменшенням його матеріаломісткості. Жорсткість фундаментної плити покращується через залучення в роботу міжповерхових перекриттів та вертикальних елементів. На кафедрі ОіФ КНУБА проф. І. П. Бойко, В. О. Сахаров [15, 16, 108] проводять моделювання НДС багатопверхових будівель з урахуванням нелінійної роботи ґрунту при будівництві, реконструкції та в умовах прибудови. В розрахунках використовується пружно-пластична модель процесу нелінійного деформування ґрунту з урахуванням структурної міцності ґрунту. В основу моделі покладено узагальнений критерій пластичності І. П. Бойка [18], який поєднує критерії Мізеса–Шлейхера–Боткіна, Кулона–Мора та дилатансійні співвідношення В. М. Ніколаєвського [83].

Математична реалізація цієї моделі передбачає використання універсального полілінійного криволінійного скінченного елемента, розробленого на базі тензорних рядів і реалізованих в рамках АСНД VESNA [17]. Цей універсальний скінченний елемент дає можливість моделювати поведінку як масивних так і тонкостінних конструкцій складної структури як інженерних конструкцій, так і ґрунтової основи. Розрахунок базується на кроковому методі продовження розв'язку по параметру. В межах одного кроку нелінійна задача розв'язується методом Ньютона–Канторовича або Ньютона–Рафсона. Розрахунки НДС 24-поверхової будівлі з підземними паркінгами проводяться максимально наближеними до реального процесу спорудження, поетапно, з урахуванням характерних технологічних кроків будівництва та поступового зведення будинку. З метою відпрацювання параметрів алгоритму та оцінки похибки результатів проводились попередні розрахунки прогнозу поведінки палів статичним навантаженням та їх порівняння з експериментальними даними. При моделюванні зведення будівлі в плитно-пальовому фундаменті формуються дві характерні зони: периферійна та центральна. Зусилля першої зони перевищують другу зону, майже в два рази. Використання лінійної моделі дає занижені зусилля в центрі – до 30 % та завищені на периферії – до 53 %, що підтверджує необхідність розв'язання задач в нелінійній тривимірній постановці. Тобто, врахування розвантаження ґрунту вносить суттєві зміни в НДС системи «споруда–фундамент–основа». Також необхідно підкреслити, що будівля є чутливим індикатором зміни властивостей системи при зміні НДС основи, нелінійності її деформування.

На кафедрі МГОіФ МГСУ проф. В. В. Ореховим [88] проведено моделювання НДС 40-поверхової будівлі у взаємодії фундаменту цієї будівлі (залізобетонна фундаментна плита товщиною 1,2 м, та розмі-

Шановний читачу!

Умови придбання надрукованих примірників монографії наведені на сайті видавництва <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-341-6>

Уважаемый читатель!

Условия приобретения печатных экземпляров монографии приведены на сайте издательства <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-341-6>

Dear reader!

You may order this monograph at the Web page <http://publish.vntu.edu.ua/get/?isbn=978-966-641-341-6>

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.