

НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ ІНСТИТУТ
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

На пресі рукопису

ПЕТРАКОВ Олександр Олександрович

УДК 624.131.5:539.4:624.074.042.3.042.6.044.046

**СКЛАДНЕ НАВАНТАЖЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ
КОНСТРУКЦІЙ ТА ОСНОВ**

05.23.02 - Основи і фундаменти

05.23.01 - Будівельні конструкції, будівлі
і споруди

Автореферат

*дисертації на здобуття наукового ступеню
доктора технічних наук*

Київ - 1994



Дисертація в рукописі
Робота виконана в Науково-дослідному та проєктовому
інституті Дніпропетровського Промбудоінвесту

Науковий консультант-
доктор технічних наук,
професор

С.М. Клепиков

Офіційні опоненти:
доктор технічних наук,
професор
доктор технічних наук,
професор
доктор технічних наук,
професор

А.І. Білаш

В.Ф. Кривий

Ю.А. Климов

Провідна організація - Інститут КиївЗНДІІП Мінбуд-
архітектури України, м. Київ

Захист відбудеться 30 червня 1994 р. на засіданні
спеціалізованої ради Д.01.14.01 Науково-дослідного ін-
ституту будівельних конструкцій, 252 027, Київ-87, вул.
Івана Клименка, 5/ 2

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці інституту

Автореферат розісланий 24 травня 1994 р.

Вчений секретар спеціалі-
зованої вченої ради,
доктор технічних наук,
професор

Г.І. Черний

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Техніко-економічні параметри будівельних конструкцій та основ багато чечому визначаються достовірністю теоретичного прогнозу про їх дійсну роботу в реальних умовах експлуатації, включаючи режими навантаження, характер силових та деформаційних діянь, особливості розвитку незворотних деформацій, послідовність утворення, розкриття та закриття тріщин та т.п. Результатом теоретичного прогнозу являється інформація з заданою довірчою імовірністю про несучу та деформаційну спроможність конструкції та основ.

В галузі розрахунку будівельних конструкцій та основ сформувались, набувши традиційності, напрями досліджень по збільшенню достовірності теоретичного прогнозу, головними з яких є урахування фізичної нелінійності роботи матеріалів; урахування деформованої схеми та геометричної нелінійності; урахування складного характеру навантаження; урахування реологічних явищ; уточнення критеріїв граничного стану. Перелічені тут фактори необхідні класифікувати як сприятливі та несприятливі. Наприклад, урахування фізичної нелінійності роботи матеріалів доводить, як правило, до збільшення теоретичної величини несучої та деформаційної здатності конструкції. Навпаки, урахування таких факторів як складне навантаження, деформована схема доводить до зменшення несучої та деформаційної здатності конструкцій в теоретичному прогнозі. Таким чином, при удосконаленні методів розрахунку будівельних конструкцій та основ не можна обмежуватись урахуванням тільки сприятливих факторів, упускаючи з уваги вплив на кінцевий результат несприятливих факторів. По цій причині пропозиції для практичного застосування повинні засновуватись на комплексному урахуванні нелінійних ефектів роботи будівельних конструкцій та основ, під яким треба розуміти аналіз разом з сприятливими найбільш суттєвих несприятливих факторів.

На підставі узагальнення результатів натурних випробувань будинків та споруд на гірничих теренах та осідаючих ґрунтах, виконаних на протязі останніх двадцяти років при безпосередньої участі автора, встановлено, що найбільш суттєвими факторами, що чинять вплив на результати розрахунків будівельних конструкцій та основ, являються; фізична нелінійність матеріалів конструкції та ґрунтів

основи /сприятливий фактор/; складни, в т.ч. змінний характер навантаження конструкцій та основ /несприятливий фактор/. Цей висновок став визначальним при виборі напрямків цих досліджень.

Дисертаційна робота виконана згідно з планами НДР Донецького ПромбудНДІ проекту в межах головного завдання II науково-технічної програми 0.55.05 на 1976-1980 р., завдання 06 програми 0.55.16 II Цільової комплексної науково-технічної програми 0.Ц.031 на 1981-1985 р., програми НДР Мінбуду УРСР на 1986-1990 р. і відображує один з головних напрямків наукової діяльності інституту: дослідження та розробка методів розрахунку та конструктивних рішень будівель та споруд, що зводяться в складних інженерно-геологічних умовах.

Ціллю дисертації являється розробка теоретичних положень та практичних алгоритмів до аналізу складного навантаження будівельних конструкцій та основ з комплексним урахуванням нелінійних ефектів на підставі деформаційної теорії пластичності. Для досягнення указаної цілі поставлені та розв'язані слідуючі задачі:

- розроблені рівняння стапу деформаційної теорії пластичності, що безпосередньо переходять до умов міцності при довільних траєкторіях навантаження в просторі деформацій та урахують розподження видів напруженого та деформованого стану і розбіжність осей головних напружень та деформацій.
- розроблені та експериментально обгрунтовані рівняння стану, що урахують при складному навантаженні нелінійну стислість матеріалу, внутрішню тертя, ділятацію, розкриття та закриття псевдотріщин, в основі яких лежить сформульована автором теорема про складне навантаження матеріалу з внутрішнім тертям;
- розроблені рівняння пластичного стану нормальних та нахилених перетинів стисло-вигнутих стержневих елементів при складному багатопараметричному навантаженні;
- розроблені ітеративні алгоритми для аналізу складного навантаження будівельних конструкцій та основ, що включають засоби складання квазілінійних рівнянь рівноваги та нерівності переміщень на підставі метода Ньютона та схеми їх розв'язування з використанням метода ПВР; показано, що запропоновані алгоритми розрахунку нелінійних систем наближаються до ідеї Бернадського-Кросса та спроможні бути квалі-

фіковані як узагальнені метод розподілу параметрів;

- запропоновані узагальнені деформаційні критерії граничних станів першої групи, в т.ч. засоби їх визначання на підставі експериментальних даних про граничну стислість зетону та розтягнутість сталі;
- на підставі запропонованої теорії розроблені та реалізовані на ЕОМ алгоритми для розрахунку на складні види навантаження: плоских та просторових стержневих систем на пружній основі; плоско просторових пластинкових систем; масивних конструкцій, в т.ч. ґрунтових масивів; розроблені алгоритми дозволяють виконувати розрахунки тонких плит та оболонок на підставі стержневих розрахункових моделей, в яких урахування поперечних деформацій здійснюється застосовано до схеми складного багатопараметричного навантаження; запропоновані алгоритми дозволяють урахувати зміну розрахункової схеми конструктивної системи в процесі навантаження, в т.ч. утворення отворів та виробок, установку елементів зміцнення та кріплення, зміну фізико-механічних характеристик матеріалів, наприклад, внаслідок замкнення осідаючих ґрунтів;
- виконан аналіз результатів натурних обстежень більш ніж 300 будинків на гірничих теренах та осідаючих ґрунтах, виявлені особливості їх взаємодії з деформованою основою та намічені шляхи удосконалення методів розрахунку в напрямі комплексного урахування нелінійних ефектів;
- виконан комплекс експериментальних досліджень з метою апробації запропонованих методів розрахунку, в т.ч. натурні випробування трьох відсіків 9-ти поверхових будинків в м. Горлівка /1978...1983 р./, стендові дослідження фрагментів залізобетонних рам з натурних конструкцій, натурні випробування фундаментних плит на природній основі, лабораторні дослідження глинистих ґрунтів в приладах змінного зсуву;
- виконано узагальнення комплексу експериментально-теоретичних досліджень, пов'язаних з розробкою нелінійних методів розрахунку конструкцій та основ, що підлягають складним навантаженням; розроблені та видані рекомендації для управління здобутих результатів проектними установами.

Методика досліджень. Для розв'язування задач постав-

менш в роботі, застосовані методи досліджень:

- метод скінчених елементів та класичні методи будівельної механіки /сил, переміщень, початкових параметрів/;
- деформаційна теорія пластичності змінних навантажень та її технічні модифікації для дослідження бетону, кам'яної кладки та ґрунту;
- метод коефіцієнта жорсткості у контактній задачі та теорія наслідкової повзучості Больцмана-Вольтерри в застосуванні до ґрунтів;
- методи Ньютона, ПВР-Ньютона та Ньютона-ПВР для розв'язування систем нелінійних операторних рівнянь;
- чисельні методи дослідження з застосуванням ЕОМ;
- експериментальні методи дослідження матеріалів, конструкцій та споруд в лабораторних, стендових та натурних умовах.

До захисту вносяться:

- теоретичні положення, що розвивають деформаційну теорію пластичності та дозволяють аналізувати в межах цієї теорії складні навантаження будівельних конструкцій та основ при довільних траєкторіях в просторі деформацій;
- алгоритми для розрахунку нелінійних систем при складному навантаженні, що кваліфіковані як узагальнений метод розподілу параметрів і засновані на ітераційних процедурах типу ПВР-Ньютона та Ньютона-ПВР;
- пропозиції про оцінку граничних станів першої та другої груп будівельних конструкцій та основ, що підлягають складному навантаженню, на підставі узагальнених деформаційних критеріїв;
- результати експериментальних досліджень будівельних конструкцій та основ при складних видах навантаження, що поширюють наукові уявлення в цій галузі.

Наукову новизну роботи складають:

- рівняння стану деформаційної теорії пластичності, що безпосередньо переходять до умов міцності при довільних траєкторіях навантаження в просторі деформацій і ураховують розподілення видів напруженого та деформованого стану, а також розбігання осей головних напружень та деформацій;
- теореми про складне навантаження матеріалу з внутрішнім тертям та засновані на них рівняння стану, що ураховують

- чіткішу стислість матеріалу, нелінійні умови міцності, дилатації і процес розкриття та закриття псевдотріщин;
- рівняння пластичного стану перетинів стержневих елементів, що дозволяють аналізувати багатопараметричні складні навантаження при обмеженій інформації про історію навантаження, обсяг якої не залежить від геометрії траєкторії;
- узагальнений метод розподілу параметрів до аналізу складного навантаження нелінійних систем, розроблений у вигляді ітераційних процедур типу ІВР-Ньютона та Ньютона-ІВР;
- алгоритми для розрахунку на складні види навантаження нелінійних стержневих систем, пластинкових систем та ґрунтових масивів, що засновані на узагальненому методі розподілу параметрів та реалізують рівняння пластинного стану, прикладнені для аналізу довільних траєкторій;
- узагальнені деформаційні критерії для оцінки граничних станів будівельних конструкцій та основ по міцності;
- приклади та устаткування по а.с. СРСР № 432367, 845048, 992654 для експериментальних досліджень матеріалів та конструкцій, що підлягають складним діям;
- результати експериментальних досліджень матеріалів, конструкцій та споруд, що розширюють наукові уявлення про механізм впливу складних видів дії.

Практична цінність роботи:

- методи розрахунку будівельних конструкцій та основ, що підлягають складним видам дії, з комплексним урахуванням нелінійних ефектів дозволяють підвищити певність та надійність теоретичного прогнозу про реальну роботу будівель та споруд, в т.ч. на гірничих та закарстованих територіях, осідливих ґрунтах та в інших складних інженерно-геологічних обставинах, забезпечуючі при цьому суттєву економію матеріальних, трудових та енергетичних витрат;
- теоретичні розробки в галузі рівнянь пластичного стану відкривають можливість для широкого застосування апарату деформаційної теорії пластичності в аналізі напружено-деформованого стану конструкцій та основ, що підлягають складному навантаженню;
- узагальнений метод розподілу параметрів для розрахунку ґрунтових та нелінійних систем, в т.ч. що підлягають складному навантаженню, дає змогу уніфікувати програмне забезпе-

чення будівельного проектування та поширює коло практично розв'язуваних задач в нелінійній постановці.

Реалізація роботи: Результати проведених досліджень використані при складанні параграфів 5.1...5.13, 6.1...6.9 та додатка 2 БН і П до проектування будівель та споруд на підвиробкових територіях /1978, 1992/, розділів 4, 6, 8 та додатків 1, 2 Посібника по проектуванню будівель та споруд на підвиробкових територіях /1986/ розділів Інструкції до проектування безкаркасних будівель на устаткованих осідаючих підвиробкових територіях /1981/, а також при розробці одинадцяти методичних посібників, виданих в доповнення до основних інструктивно-нормативних документів.

Робота також упроваджена в реальному проектуванні при розрахунках конструкцій ряду промислових об'єктів з урахуванням впливу складних навантажень, в т.ч. будівель та споруд Єнакієвського коксохімічного заводу, Єнакієвського металургійного заводу, металопрокатного виробництва Донецького металургійного заводу, багатопверхового складського корпусу видавництва "Радянська Донеччина", корпусу по виробництву суперфосфату Константинівського хімічного заводу, виробничого корпусу Донецької кондитерської фабрики, будівель та споруд заводу ДСП в м. Макіївка, виробничих споруд Макіївського заводу металоконструкції, будинків та споруд Макіївського хлібозаводу, будинку діагностичного центру в м. Донецьку, штучних основ споруд метрополітена у м. Донецьку та ряду інших об'єктів.

Від упровадження результатів досліджень при проектуванні та будівництві конкретних об'єктів в складних інженерно-геологічних умовах одержан за рахунок економії матеріальних, трудових та енергетичних ресурсів економічний ефект у розмірі більш ніж 5 млн. рублів /в цінах 1984 р./.

Апробація результатів. Основні результати проведених досліджень докладалися: на галузевій Республіканській науково-технічній конференції з проблем оптимізації будівництва шахт /Донецьк, 1976/; на Загальносоюзній нараді "Фундаментобудівництво в складних ґрунтових умовах" /Алма-Ата, 1977/;² на засіданнях науково-технічної ради Держбуду СРСР /Москва, 1978; Донецьк, 1980/; на засіданнях Науково-Координаційної ради Держбуду СРСР з проблеми "Проведення досліджень та розробка методів розрахунку та конструктивних рішень будинків та споруд, що споруджуються на осідаючих та підвиробкових територіях" /Київ, 1980; Алма-Ата, 1980/; на V Міжнародному симпозіумі Комісії 66 "Промислові будинки" МСС на тему "Комплексний під-

хід до розв'язування задач при проектуванні та будівництві цивільних будівель та підприємств /Москва, Стамбул, 1981/; на Багатонаціональній науково-технічній нараді "Підвищення ефективності експлуатації та реконструкції промбудівель металургійної, машинобудівної та гірничорудної промисловості /Макіївка, 1981/; на Багатонаціональній координаційній нараді постійної комісії по залізобетонних конструкціях багатопверхових будинків Науково-координаційної ради по бетону та залізобетону Держбуду СРСР "Ефективні конструкції та методи розрахунку несучих систем, елементів та вузлів безкаркасних будинків" /Вільякс, 1984/; на Чотирнадцятій науково-виробничій нараді-семінарі "Конструктивні форми та методи розрахунку багатопверхових будинків в умовах вічної мерзлоти та сейсміки" /Іркутськ, 1988/; на Міжнародній конференції з механіки ґрунтів та фундаментобудування /Талін, 1988/; на Республіканській науково-технічній конференції "Удосконалення залізобетонних конструкцій, що роблять при складних видах деформацій, та їх упрощення в будівельну практику" /Полтава, 1989/; на Дванадцять третьої та Дванадцять четвертої Міжнародних конференціях в галузі бетону та залізобетону /Москва, - Ленінград, 1991; Дамбаи, 1992/; на науково-практичних конференціях Макіївського інженерно-будівельного інституту /Макіївка, 1980, 1982, 1984/; на засіданнях науково-технічної ради Держбуду Української РСР /Київ, 1983/; на засіданнях Вченої ради Донецького ПромбудНДІ проекту /Донецьк, 1976...1991/.

Публікації. По матеріалах виконаних досліджень опублікована сорок одна друкована робота, перелік яких наведено в дисертації, в т.ч. одна книга, шість брошур та одна програма до ЕОМ. Список основних надрукованих робіт приміщен на кінці автореферату.

Обсяг та структура роботи. Дисертація складається з вступу, шести розділів, списку літератури з 321 наймування та додатку, оформленого у вигляді окремого тому. Викладена на 348 сторінках машинописного тексту, ілюстрована 129 малюнками та 9 таблицями.

Автор приносить глибоку вдячність доктору технічних наук, професору Клепикову С.М. за цінні поради та рекомендації, що були ним надані до дисертації.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність розглядаємих проблем, визначені цілі та задачі, сформульована новизна та практичне значен-

ни досліджень.

Аналітичний огляд робіт, що відносяться до дослідженого кола проблем, надається у розділі I. Переважна кількість вітчизняних та закордонних авторів, що пов'язані з удосконаленням методів розрахунку будівельних конструкцій та основ, відноситься до пропозиції по урахуванню фізичної нелінійності роботи матеріалів в умовах простого навантаження.

Пропозиції по урахуванню складного навантаження будівельних конструкцій та основ розроблені, в цілому, на рівні публікації і не знайшли належного відображення в нормах та посібниках будівельного проектування, в програмах САПР, в галузевих прикладних програмах та в інших матеріалах методичного характеру. Пропозиції, що засновані на рівняннях стану типу Грандтля-Рейса, розробили Бугров, Горбунов-Юсатов, Генієв, Вялов та інші. Рівняння стану типу Друккера-Прагера використали у своїх розробках Грошев, Дідух Зарецький, Іоселевич, Качанов, Лебедєв, Ломбардо, Цісаренко, Проценко, Широков. Указаними авторами запропоновані поверхні навантаження у вигляді поверхні обертання. В зв'язку з цим не ураховується деформаційна анізотропія матеріалу, а клас аналізованих, складних навантажень обмежується траєкторіями переважного напрямку. Пропозиції, засновані на рівняннях стану деформаційної теорії пластичності, розробили Генієв, Крижановський, Москвитин, Петраков, Ржевський, Ципенюк. Указані пропозиції ураховують деформаційну анізотропію матеріалу і дозволяють аналізувати достатньо просторі клас складних, в т.ч. змінних навантажень.

Рівняння стану загальної теорії пластичності Іллішина у явному вигляді для аналізу будівельних конструкцій та основ не використовуються через відсутність відповідних емпіричних залежностей для матеріалів, що застосовуються у будівництві.

Для аналізу бетонних конструкцій та кам'яного муру застосовуються квазіізотропні та ортотропні моделі. Квазіізотропні моделі запропонували Васильков, Генієв, Кисюк, Круглов, Лейтес, Топшин. Пропозиції щодо розвитку ортотропних моделей розробили Баллан, Барашиков, Бідний, Карпенко, Клованіч, Козачевський, Кричевський, Мухамедієв, Осадченко, Пересилкин, Сапожников. Ортотропні моделі засновані на гіпотезі про збіг осей головних напружень та деформацій в процесі складного навантаження, в зв'язку з чим не можуть бути використані для аналізу довільних траєкторій. Моделі для ґрунтових основ ураховують нелінійну стислість матеріа-

у, внутрішнє тєртя, ділатацию та вплив виду напруженого стану. Пропозиції, що ураховують складне навантаження ґрунтових основ, розробили Бугров, Вялов, Горбунов-Посадов, Дідух, Зарецький, Захаров, Іващенко, Іоселевич, Крижановський, Ломізе, Ніколаєвський, Чевикин, Широков. Зазначені пропозиції засновуються, в цілому, на рівняннях стану теорії пластичної течії і не ураховують деформаційну анізотропію ґрунту.

Найбільший розвиток в аналізі складних навантажень на здобули одномірні інтегральні моделі для перетинів стержневих залізобетонних конструкцій, пружнопластичних в'язей та елементів, що модулюють ґрунтову основу. Такі моделі запропонували Аизенберг, Бамбура, Зачинський, Геммерлинг, Грищенко, Диховичний, Гликін, Гуца, Ікрин, Клепиков, Килимник, Кузнецов, Козачевський, Кумпак, Леміш, Любаров, Любимов, Мазо, Масленников, Москальов, Назаренко, Неміровський, Островський, Цикарський, Петраков, Попов, Расторгуєв, Сливкер, Фигаровський, Чирас. За допомогою зазначених моделей, в цілому, аналізуються змінні навантаження стержневих конструкцій, що підлягають динамічним, в т.ч. сейсмічним діям, а також балкові конструкції на пружній основі.

Ефективність нелінійних методів розрахунку будівельних конструкцій та основ безпосередньо залежить від застосовуваних для оцінки їх результатів критеріїв граничних станів. Нормами будівельного проектування запроваджуються силові критерії граничних станів першої групи, засновані на теоріях міцності Галілея-Ренкіна, Губера-Мізеса-Генкі, Мора-Кулона, Мізеса-Шлейхера-Боткіна, Надаї та ін. Зазначені теорії міцності удосконалили Біленькая, Вялов, Генієв, Крижановський. Ними запропоновано урахувати вплив на міцність матеріала виду напруженого стану та нелінійну залежність в формулі Мора-Кулона. Більш прогресивними є критерії граничних станів, що засновуються на деформаційних теоріях міцності Маріотта-Сен-Венана, Беккера-Вестергаарда та інших. Деформаційні критерії граничних станів запропонували Аизенберг, Бамбура, Зачинський, Бельський, Геммерлинг, Килимник, Петраков, Стрелецький, Ступак, Чернов, Чирас. Деформаційні критерії знайшли відображення в нормах проектування сталевих конструкцій, будинків та споруд на підвиробкових територіях та осідаючих ґрунтах. Маються пропозиції про нормування граничної стислості бетону для граничних станів першої та другої груп. Розрахунок нелінійних систем, в т.ч. що підлягають складним навантаженням, виконується, як правило, методом пружних рішень Ілля-

шина. Відрізняють крокові та кроково-ітераційні методи, а також методи прямих ітерацій. Останні реалізуються у формі методів початкових напружень, початкових деформації та змінних жорсткостей. Алгоритми, засновані на методах пружних рішень, запропонували Аджібеков, Безухов, Бугров, Габричідзе, Геммерлинг, Городецький, Данієлов, Дюкюї, Зарецький, Зенкевич, Кенчан, Кваша, Курило, Левчич, Масленников, Москальов, Назаренко, Островський, Пижарський, Резников, Ржаницин, Сливкер, Слободян, Федосєв, Чернов, Шахнович, Широков.

В деяких роботах аналіз складного навантаження зводиться до задачі про приладнення конструкцій у варіаційній постановці. Пропозиції в цьому напрямку зробили Власов, Маленов, Проценко, Чижєв, Чирас. Результати таких розрахунків оцінюються по імовірносним критеріям граничних станів. Промовляються пропозиції, що розрахунок нелінійних систем найбільш ефективно виконується методом безпосереднього складання та розв'язування систем нелінійних рівнянь рівноваги чи нерозривності перемішень, в т.ч. складених з використанням варіаційних принципів будівельної механіки. Пропозиції, що пов'язані з методами складання та розв'язування систем нелінійних рівнянь рівноваги та нерозривності перемішень, зробили Бідний, Грищенко, Диховичний, Клованіч, Осадченко, Петраков. Зазначені автори використовують метод простої ітерації, а також ітераційні методи, що засновані на ідеї Ньютон. Відзначається, що застосування методу Ньютон та його модифікації має ряд суттєвих переваг, в т.ч. гарантує збіжність ітераційних процесів при достатньо малих ступенях навантаження.

В другому розділі викладені теоретичні основи розрахунку будівельних конструкцій та основ, що підлягають складному навантаженню. Ця проблема безпосередньо пов'язана з нелінійним аналізом будівельних конструкцій та основ і вмієє в себе два головних аспекта: рівняння пластичного стану для складних траєкторій навантаження; критерії граничних станів до стадії, що є руйнуванням. Найбільш прийнятною основою для розробки рівнянь стану при складному навантаженні будівельних конструкцій та основ є загальна теорія пластичності Ілліашина. Однак її застосування в безпосередньому вигляді стримується відсутністю необхідних емпіричних залежностей, що заправджують взаємозв'язок компонентів вектора напружень з геометричними характеристиками траєкторій навантаження в просторі деформації. Здобуття таких залежностей для бетонів, кам'яного муру, будівель-

них сталей, ґрунтів та інших матеріалів визначало б здійснення кореної реформи нормативної бази, що застосовується у будівництві.

Рівняння стану теорії пластичної течії прикладнені до аналізу складного навантаження. Але при цьому практично всі реалізовані версії цієї теорії засновані на поверхнях навантаження у вигляді поверхні обертання. Останнє визначає, що при розвантаженні та реверсивному навантаженні до наперед досягненого рівня матеріал працює пружно, що цілком не згоджується /похибка складає сотні відсотків/ з даними експериментальних досліджень будівельних конструкцій та основ.

Деформаційна теорія пластичності усуває цей недолік, що дозволяє достатньо просто урахувувати накопичення пластичних деформацій при розвантаженні та реверсивному навантаженні /ефект Баушінгера/. Однак рівняння стану цієї теорії /Москвитин/ розроблені тільки для змінних навантажувальних без урахування зміцнення, тобто для матеріалів, що не мають внутрішнього тертя. Для більшості будівельних матеріалів /бетона, ґрунти та т.п. / внутрішнє тертя є визначним при запровадженні міцності. Розташовані в другому розділі пропозиції дозволяють удосконалити рівняння стану деформаційної теорії пластичності та розповсюдити їх на аналіз довільних траєкторій навантаження з урахуванням внутрішнього тертя та нелінійної стислості матеріалу. При цьому необхідна для такого аналізу інформація про властивості матеріалів вкладається в межі нормативної бази, що застосовується в будівництві.

В першому підрозділі другого розділу запропоновані рівняння стану для матеріалів з стаціонарною поверхнею міцності. Подальше вони використовуються як основа для формулювання рівнянь стану загального виду для матеріалів з нестаціонарною поверхнею міцності. Проаналізовано чотири типи рівнянь пластичного стану для матеріалів з стаціонарною поверхнею міцності, що відзначаються покладеннями в їх основу гіпотезами: вектори прирішень зсувних напружень та деформацій від точки розвантаження колінеарні, осі головних напружень та деформацій в процесі навантаження збігаються /тип А/; рівняння типу А, для яких обмеження на взаємне розташування осей головних напружень та деформацій не накладаються /тип В/; рівняння типу В, для яких діаграма зсуву при розвантаженні залежить від історії навантаження /тип С/; вектори прирішень зсувних напружень та деформацій на достатньо малих ступенях на-

вантаження по лінійній, діаграма зсуву при розвантаженні залежить від історії навантаження /рис. 1/. Рівняння пластичного стану типу Д сформульовані таким чином. Розглядаються три точки траєкторії навантаження: точка розвантаження /А/; точка попередостаннього ступеня навантаження /В/; точка останнього ступеня навантаження /С/. Побудови виконуються в шестимірному просторі зсувних напружень та деформацій. В просторі зсувних напружень надан радіус гіперсфери міцності R , рівний за числом міцності матеріалу при одновісному напруженому стані /стиск чи розтяг/. Як вихідні дані, надаються тензори напружень в точках А, В траєкторії та тензори деформацій в точках А, В, С. Підлягає визначенню тензор напружень в точці С. Вихідними даними являються параметри, що визначають діаграму зсуву при простому навантаженні. В найпростішому випадку цими параметрами являються початковий модуль зсуву G та радіус гіперсфери міцності R . Перш за все з аналізу наданої траєкторії навантаження у просторі деформацій визначається напрямок навантаження з точки В у точку С. При цьому навантаження вважається активним якщо між векторами $\vec{E}_{i(AB)}$ та $\vec{E}_{i(BC)}$ не є гострим. В протилежному випадку навантаження по траєкторії ВС вважається розвантаженням і точка останнього розвантаження переноситься з А у В.

Діаграма зсуву при навантаженні по траєкторії АВС подібна діаграмі зсуву при простому навантаженні, а її параметрами в найпростішому випадку являються: початковий модуль зсуву при розвантаженні та фіктивна міцність матеріалу, рівна за числом модулю вектора, проведеного з точки А у точку перетину продовження траєкторії ВС в гіперсфері міцності /точка С'/. Фіктивна міцність матеріалу при розвантаженні з точки А визначається в такій послідовності. Визначається коефіцієнт подібності колінеарних з умови задачі векторів $\vec{O}_{i(C'V)}$ та $\vec{E}_{i(CV)}$ розв'язуванням квадратного рівняння:

$$(\vec{O}_{i(C'V)} + \psi \vec{E}_{i(CV)}, \vec{O}_{i(C'V)} + \psi \vec{E}_{i(CV)}) = R^2, \quad /1/$$

де у дужках припускається скалярний добуток суми векторів. З урахуванням того, що $\vec{O}_{i(C'V)} = \psi \vec{E}_{i(CV)}$, фіктивна міцність матеріалу визначається по формулі:

$$|\vec{O}_{i(C'V)}^{\max}| = |\vec{O}_{i(AA)} + \psi \vec{E}_{i(CA)}|. \quad /2/$$

Початковий модуль зсуву $G_{(A)}$ при розвантаженні з точки А визначається з умови переходження діаграми зсуву через точку В з координатами $O_{i(AA)}$, $E_{i(AA)}$. Таким чином, діаграма зсуву при розвантаженні, що безпосередньо переходить до умови міцності, наперед не

постулюється, а її параметри залежать від історії попереднього навантаження. В залежності від величини інтенсивності приріщення деформації $\epsilon_{i(cA)}$ за допомогою діаграми зсуву визначається величина інтенсивності приріщення напружень $\sigma_{i(cA)}$ при розвантаженні точки А у точку С. Відповідно до прийнятої гіпотези вектор приріщень напружень $\vec{\sigma}_{i(cA)}$ колінеарен вектору приріщень деформації $\vec{\epsilon}_{i(cA)}$. Коefіцієнт подібності цих векторів знаходиться з квадратного рівняння:

$$(\vec{\sigma}_{i(cA)} + \gamma_{(c)} \vec{\epsilon}_{i(cA)}, \vec{\sigma}_{i(cA)} + \gamma_{(c)} \vec{\epsilon}_{i(cA)}) = \sigma_{i(cA)}^2 \quad /3/$$

Напруження в точці С траєкторії навантаження визначаються по формулах:

$$\sigma_{z(c)} = \frac{2}{3} \gamma_{(c)} (\epsilon_{z(cA)} - \epsilon_{0(cA)}) + \sigma_{0(cA)} + \sigma_{z(cA)}; \quad /4/$$

де ϵ - приймає значення x, y, z , а $tr - xy, yz, zx$.

Параметри об'ємного деформування, що входять до формул /4/, в випадку плоского напруженого стану $\sigma_{z(c)} = 0$ / визначаються як функції від коefіцієнта Пуассона: $\rho = (\frac{1}{3} \gamma_{(c)} - 1,5K) / (\frac{2}{3} \gamma_{(c)} + 1,5K)$;

$$\epsilon_{0(cA)} = \frac{1+\rho}{3} (\epsilon_{x(cA)} + \epsilon_{y(cA)}); \quad \sigma_{0(cA)} = \frac{2}{3} \gamma_{(c)} (\epsilon_{x(cA)} + \epsilon_{y(cA)} - 2\epsilon_{0(cA)}), \quad /5/$$

де K - модуль об'ємної деформації.

Перший підрозділ другого розділу скінчується результатами досліджень рівнянь стану, що засновуються на різних гіпотезах. Відмічається, що використання гіпотези про збігання осей головних напружень та деформації /ортотропна модель/ для окремих траєкторій наводить до некоректностей типу розривів функцій реакції, немонотонності цих функцій на ділянках монотонного навантаження, від'ємність похідних реакції по переміщенням по їхньому напрямку.

Вказані некоректності, характерні для рівнянь стану типу /А/, наводять до розбіжності ітераційних процесів при розрахунку конструкції, наприклад, ітерації типу Ньютон-ІВР за рахунок зникнення додатної визначеності матриці Фреше. Відмічені особливості рівнянь стану типу /А/ не дозволяють рекомендувати їх для аналізу довільних траєкторій навантаження.

Спроби постулювати діаграму зсуву при розвантаженні в рівняннях стану типу /В/ наводять до некоректностей типу немонотонності зміни реакції на ділянках монотонного навантаження. Причиною проявлення цієї некоректності є розривність в функції, що описує діаграму зсуву, при зміні величини фіктивної міцності матеріалу.

Рівняння стану типу /С/, в яких модуль зсуву при розвантаженні є змінна величина, що залежить від траєкторії попереднього наванта-

ження, коректні на всім діапазоні складного навантаження. До недосконалостей цього типу рівнянь слід віднести те, що до першої точки розвантаження вони наводять до збігання видів напруженого та деформованого стану незалежно від траєкторії навантаження, що суперечить даним експериментів.

Найбільш загальними залежностями є рівняння стану типу /Д/. Аналіз, виконаний з використанням указаних рівнянь, виявляє, що для окремих траєкторій навантаження до першої точки розвантаження відбувається розбігання кутів нахилу осей головних напружень та деформації, а також розпогодження видів напруженого та деформованого стану. Указані явища узгоджуються з рядом експериментальних даних.

В другому підрозділі другого розділу розглядаються рівняння стану для матеріалів, що мають внутрішнє тертя та діляцію.

Сформульована теорема про складне навантаження матеріалу з внутрішнім тертям:

Напруження при навантаженні з точки В у точку С складаються з дійсних напружень в точці В, прирішень напружень, девіатор яких подібен девіатору прирішень деформації, та прирішень напружень, обумовлених прирішенням середнього напруження, девіатор яких подібен девіатору дійсних напружень в точці В, причому коефіцієнти подібності указаних девіаторів визначаються з розв'язування задач про складне навантаження по наданій траєкторії в просторі деформацій матеріалу з стаціонарною поверхнею міцності, що визначається середніми напруженнями в точках С та В траєкторії. Таким чином для аналізу матеріалу з внутрішнім тертям додатковими вихідними даними являються: діаграма міцності в осях $\sigma_0 - \tau_0$, діаграма ущільнення в осях $\epsilon_0 - \sigma_0$. Між указаними діаграмами та діаграмою зсуву повинна бути встановлена однозначна відповідність. Зокрема, діаграма зсуву в даному випадку зображується сімейством кривих, параметром якого є радіус гіперсфери міцності, що встановлюється по діаграмі міцності в залежності від величини середнього напруження σ_0 . В свою чергу середнє напруження визначається по діаграмі ущільнення в залежності від об'ємної деформації. При цьому аналіз змінного об'ємного деформування здійснюється незалежно. Теорема про складне навантаження матеріалу з внутрішнім тертям реалізується з використанням рівнянь стану типу /Д/. Теорема про складне навантаження буде чинною не тільки для однопараметричної діаграми ущільнення $\sigma_0 = \sigma_0(\epsilon_0)$, але і для більш загального виду цієї

діаграми, зокрема, що ураховує явище ділатансії, тобто, коли $\sigma_0 = \sigma_0(\epsilon_0, \sigma_1)$. Розглянут також варіант трансформованих в процесі обчислювання діаграм міцності та ущільнення в зв'язку с процесами утворення, розкриття та закриття псевдотріщин. Наведені результати експериментальних досліджень складних траскторій навантаження зразків глинистих ґрунтів в приладах змінного зсуву. Найбільше збігання експериментальних даних з теоретичними оцінками спостерігається на ділянках пружного деформування та розвинутих пластичних деформацій. При повторному навантаженні зразків ґрунту /після неповного розвантаження/ спостерігається описане в технічній літературі явище спізнення скалярних властивостей, в результаті чого початково ґрунт деформується більш жорстко, чим це приписується теорії. Загальний висновок містить в припустимості прийнятих теоретичних засновків для описання рівнянь пластичного стану матеріалу з внутрішнім тертям при складних навантаженнях.

В третьому підрозділі другого розділу запропоновані рівняння еластичного стану для перетинів стержневих елементів. Особливість, що відрізняє ці рівняння, є те, що довільна історія навантаження ураховується за допомогою чотирьох параметрів, характеризуючих досягненню рівень напружно-деформованого стану перетину. Розглядені також багатопараметричні діаграми деформування, що упроваджують взаємозв'язок між узагальненими зусиллями та деформаціями в нормальних та вахилих перетинах стержневих елементів, в т.ч. моделюючих роботу ґрунтової основи.

В четвертому підрозділі другого розділу обговорюється проблема граничних станів будівельних конструкцій та основ, яка безпосередньо пов'язана с особливостями нелінійного аналізу. Запропоновані узагальнені деформаційні критерії для оцінки граничних станів першої групи, що дозволяють більш повно використовувати переваги, які надають нелінійні методи розрахунку будівельних конструкцій та основ. Виконан аналіз статистичної забезпеченості запропонованих деформаційних критеріїв та показана їх ефективність при запровадженні деформаційної спроможності споруд на підвиробкових територіях та осідальних ґрунтах. На прикладі аналізу результатів натурних випробувань великопанельного будинку показана доцільність використання єдиного деформаційного критерія для комплексної оцінки граничних станів першої та другої групи.

В третьому розділі досліджуються ітераційні алгоритми для розрахунку нелінійних систем, що підлягають складному навантаженню.

у вигляді логічно розгалуженні алгоритми-процедури, досліджується операторне рівняння виду:

$$F(\vec{z}) = \Phi(\vec{z}) - \vec{p} = 0, \quad /6/$$

де \vec{p} - вектор навантажень; \vec{z} - вектор переміщень.

Лінеаризація цього рівняння за методом Ньютона має вид:

$$\Phi'(\vec{z}^k) \vec{z} = \Phi'(\vec{z}^k) \vec{z}^k - \Phi(\vec{z}^k) + \vec{p}, \quad /7/$$

де $\Phi'(\vec{z})$ - похідна по Фреше від нелінійного оператора $\Phi(\vec{z})$; \vec{z}^k - вектор-точка, в якій гіперплоскість /7/ торкається поверхні /6/.

Розв'язування операторного рівняння /6/ методом Ньютона зводиться до рекурентної процедури, що впливає з /7/:

$$\vec{z}^{k+1} = \vec{z}^k - (\Phi'(\vec{z}^k))^{-1} F(\vec{z}^k) = G(\vec{z}^k). \quad /8/$$

Ортега Дл /1970/ довів теорему про збіжність алгоритму /8/, згідно з якою оператор відображення $G(\vec{z}^k)$ є стислим в деяким оточенні R точки \vec{z}^* - точного рішення задачі, якщо поверхня /6/ в указаному оточенні не має розривів першого та другого роду. Виконання останньої умови досягається на практиці застосуванням рівнянь стану, функції яких можна двічі диференціювати. Крім того в задачах механіки похідна по Фреше $\Phi'(\vec{z})$ уявляє квадратну симетричну додатньо визначену матрицю. З цього випливає, що система лінійних рівнянь /7/ може бути розв'язана ІВР-методом, а процедура Ньютона /8/ збігається до точного рішення при призначенні достатньо малих ступенів навантаження. Таким чином алгоритм /8/ породжує методи Ньютона-ІВР. Безпосереднє застосування ІВР-ітерацій до системи нелінійних рівнянь /6/, в яких нелінійні рівняння з одним невідомим розв'язуються методом Ньютона, породжує методи ІВР-Ньютона.

В проведених дослідженнях показано, що ІВР-ітерації являються математичним аналогом процедур розподілу параметрів /нерівноважні моменти, сил, розривних переміщень/, що знайшли в свій час застосування в механіці /Бернадський, Кросс, Сосіс та ін./ . Показано також, що процедури розподілу параметрів можуть здійснюватись в довільних нелінійних системах. В цьому випадку їх математичним аналогом є метод ІВР-Ньютона. Алгоритми Ньютона-ІВР можна також розглядати як математичні аналоги метода розподілу параметрів з уточненим виразом для похибки. В результаті узагальнення запроваджених досліджень сформульован принцип розподілу параметрів в невизначених механічних системах. Ітераційна процедура методу розподілу нерівноважних реакцій в основній кінематично визначеній систе-

$$\begin{aligned}
 & \text{як виявляється рекурентною формулою: } U_{i,j,k}^{k,p+1} = U_{i,j,k}^{k,p} - \omega \left(\sum_{j \in J} \frac{\partial Z_{i,j,k}(\vec{u}^k)}{\partial u_{i,j,k}} \right) - \\
 & \cdot \left[\sum_{j \in J} \left[\sum_{c \in C} \left[\frac{\partial Z_{i,j,c}(\vec{u}^k)}{\partial u_{i,j,c}} (U_{i,j,c}^{k,p+1} - U_{i,j,c}^k) + \frac{\partial Z_{i,j,c}(\vec{u}^k)}{\partial u_{i,j,c}} (U_{i,j,c}^{k,p+1} - U_{i,j,c}^k) + \frac{\partial Z_{i,j,c}(\vec{u}^k)}{\partial u_{i,j,c}} \right. \right. \right. \\
 & \cdot (U_{i,j,c}^{k,p+1} - U_{i,j,c}^k) \left. \right] + Z_{i,j,k}(\vec{u}^k) \left. \right] - P_{i,j,k}, \quad /9/
 \end{aligned}$$

де U - переміщення; Z - реакція в вузлі скінченного елемента; P - вузлове навантаження; i - номер вузла системи; j, ϱ - номер напрямку /обі координат/; k - номер ітерації Ньютона; p - номер ітер-ітерації; ω - релаксаційний коефіцієнт; J - список номерів скінчених елементів, що примикають до i -го вузла; δ - дискретна функція, що приймає значення 0 та 1; i_1, i_2, m_1 - номери стандартних i, j, m - вузлів скінченного елемента.

Похідні реакції по переміщенням, що входять до рівняння /9/, являються елементами матриць жорсткості скінчених елементів. Таким чином, у відношенні від методу Ньютона метод розподілу нерівноважних реакцій не потребує для своєї реалізації збору матриць жорсткості скінчено-елементної системи в цілому. Для задач з великою кількістю степенів волі ця особливість рівнянь /9/ доводить до суттєвої економії оперативної пам'яті ЕОМ. В зв'язку з тим, що аналіз складних навантажень припускає використання рівнянь стану у вигляді логічно розгалужених неголономних процедур, похідні реакції по переміщенням у формулі /9/ визначаються, як правило, чисельним диференціюванням. По цій причині алгоритм /9/ складен таким чином, що похідні, які входять до нього, можуть бути обчислені в результаті однієї варіації переміщення, що уточнюється на розглянутому кроці. Тим самим усувається принципова різниця в обчислюванні алгоритмів Ньютона-ПВР та ПВР-Ньютона з всіма впливаючими звідси перевагами, властивими до алгоритму ПВР-Ньютона.

Ефективність алгоритму /9/ досліджувалась в порівнянні з методом Ньютона, в якому рівняння /7/ розв'язувались по комплексній схемі Гаусса. В виконаних чисельних дослідженнях виявлені помітні переваги алгоритму /9/ в порівнянні з методом Ньютона щодо витрат машинного часу на розв'язування тестових задач. С достатнім приближенням можна вважати, що витрати машинного часу при реалізації алгоритму /9/ лінійно залежать від кількості степенів волі системи. При реалізації метода Ньютона має місце квадратична залежність витрат машинного часу від кількості степенів волі системи. Цей висновок узгоджується з звичними результатами, зв'язаними з оцінкою точних та ітераційних методів розв'язування систем лінійних алгебраїчних рівнянь. Чисельними дослідженнями встановлено, що для ск-

рамого класу задач, наприклад, конструкції на пружній основі, область локальної збіжності в алгоритмі /9/ більш вузька, чим в методі Ньютона. В цих випадках розв'язання задачі досягається зменшенням ступеня навантаження або застосуванням комбінованого методу, в якому перші дві-три ітерації виконуються з методу Ньютона, а всі останні по алгоритму /9/.

Згідно з принципом розподілу параметрів поряд з розподілом нерівноважних реакцій в основній кінематично визначеній системі також може здійснюватися розподіл розривних переміщень в статично визначених основних системах. Алгоритм методу розподілу розривних переміщень в статично визначених основних системах має вид:

$$\bar{z}_i^{k,p} = \bar{z}_i^{k,p-1} - \omega \left[\bar{z}_i \left(\frac{\bar{M}_{i,c}}{E_k(\bar{z}^k)} + \frac{\bar{Q}_{i,c}}{E_k(\bar{z}^k)} + \frac{\bar{N}_{i,c}}{E_k(\bar{z}^k)} \right) d_c \right]^{-1} \left[\bar{z}_i \left[\bar{M}_{i,c} \left(\frac{F_{i,c}}{E_k(\bar{z}^k)} + \chi_c(\bar{z}^k) \right) + \bar{Q}_{i,c} \left(\frac{F_{i,c}}{E_k(\bar{z}^k)} + \gamma_c(\bar{z}^k) \right) + \bar{N}_{i,c} \left(\frac{F_{i,c}}{E_k(\bar{z}^k)} + \varepsilon_c(\bar{z}^k) \right) \right] d_c + \Delta_{i0} \right], \quad (10)$$

де \bar{z} - внутрішнє зусилля; \bar{M} , \bar{Q} , \bar{N} - базисні функції /одичні етери/; χ , γ , ε - узагальнені деформації; d - розмір скінченного елемента; ω - релаксаційний коефіцієнт; k - номер ітерації Ньютона; p - номер ІВР-ітерації; i - номер невідомого внутрішнього зусилля; ℓ - номер скінченного елемента; $\bar{E}\bar{F}$, $\bar{E}\bar{F}$ - дотичні жорсткісні характеристики; Δ - початкове переміщення; F_M , F_Q , F_N - функції, що накопичуються в скінчених елементах /розрахункових перетинах/ в процесі виконання ІВР-ітерації відповідно до алгоритму:

$$F_{X,c}^p = \sum_{i=0}^k \sum_{\ell=1}^L (\bar{z}_i^{k,p} - \bar{z}_i^{k,p-1}) \bar{X}_{i,c}, \quad (11)$$

де X - один з символів M , Q або N .

Уведені допоміжні функції /11/ дозволяють зорганізувати обчислення при реалізації алгоритму /10/ по найпростішій схемі, що адекватна реалізації методу ІВР-Ньютона. При цьому математичним аналогом процедури /10/ являється багатокроковий метод Ньютона-ІВР, який має в зрівнянні з методом ІВР-Ньютона квадратичну швидкість збіжності.

При розв'язуванні динамічних задач елементи матриці Фреше в рівняннях /7, 8/ визначаються виразом:

$$\frac{\partial f_i^0(\bar{z}^k)}{\partial \bar{z}_i} = \frac{\partial f_i^0(\bar{z}^k)}{\partial \bar{z}_i} + \frac{1}{\Delta t} (a_i + \eta); \quad \frac{\partial f_i^0(\bar{z}^k)}{\partial \bar{z}_j} = \frac{\partial f_i^0(\bar{z}^k)}{\partial \bar{z}_j}, \quad i \neq j, \quad (12)$$

де $f_i^0(\bar{z}^k)$ - ич вектор нелінійного оператора $\Phi(\bar{z}^k)$; Δt - інтевал чисельного диференціювання по часу; a_i/g - маса, приведена до вузла з i - ою степінню волі; η - коефіцієнт в'язкості.

просіяння енергії/.

З урахуванням залежностей $U_{i,j}^{k,r}$ від $U_{i,j}^k$ алгоритм $U_{i,j}^k$ застосовано до розв'язання динамічних задач в такій виразок:

$$U_{i,j}^{k,r+1} = U_{i,j}^{k,r} - \omega \left[\frac{\partial Z_{i,j}^k(\bar{U}^k)}{\partial U_{i,j}^k} + \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{Q_i}{g \Delta t} + \gamma \right) \right]^{-1} \left[\frac{\partial Z_{i,j}^k(\bar{U}^k)}{\partial U_{i,j}^k} (U_{i,j}^{k,r+1} - U_{i,j}^k) + \frac{\partial Z_{i,j}^k(\bar{U}^k)}{\partial U_{i,j}^k} (U_{i,j}^{k,r} - U_{i,j}^k) + Z_{i,j}^k(\bar{U}^k) + \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{Q_i}{g \Delta t} + \gamma \right) \cdot (U_{i,j}^{k,r} - U_{i,j}^k) \right] + \frac{1}{\Delta t} \left(\frac{Q_i}{g \Delta t} + \gamma \right) U_{i,j}^k - \frac{Q_i}{g(\Delta t)^2} [2U_{i,j}^{k,r+1} - U_{i,j}^{k,r}] - \frac{\gamma}{\Delta t} U_{i,j}^{k,r} - P_{i,j}^k. \quad (13)$$

На першому ступені навантаження умови на межах в переміщеннях доцільно надати в формі:

$$U_{i,j}^{k+1} = 0; \quad U_{i,j}^{k+2} = -U_{i,j}^k \quad (14)$$

Для наступних ступенів навантаження ці переміщення перевизначаються по формулах:

$$U_{i,j}^{k+2} = U_{i,j}^{k+1}; \quad U_{i,j}^{k+3} = U_{i,j}^{k+1} \quad (15)$$

де k_{N+1} - номер останньої ітерації Ньютона на розглядаемому ступені навантаження.

Найбільша ефективність від використання алгоритмів /9, 10, 13/ досягається при розрахунку складних систем з багатьма степенями волі, коли при традиційнім підході потребується застосування суперелементних розрахункових схем.

В четвертому розділі доводяться результати дослідження пластинково-стержневих систем на пружній основі, що підлягають складним видам навантаження. Сполучення пластинкових та шарнірно-стержневих розрахункових схем дозволяє розглядати залізобетонні конструкції як композитні, тобто, що складяться з бетону та арматурних стержнів. При цьому бетон може працювати в умовах плоского напруженого стану /стіни, балки та балкові плити/, плоскої деформації /підпірні стіни/ або осесиметричних деформацій /круглі плити з осесиметричним навантаженням/. Просторові шарнірно-стержневі системи можуть розглядатися як моделі об'ємних конструкцій, в т.ч. залізобетонних конструкцій, що розраховуються по каркасно-стержневій схемі відповідно до норм ЄКБ.

Таким чином, просторові пластинково-стержневі системи можуть використовуватися для розрахунку достатньо широкого класу будівельних конструкцій на пружній основі. При цьому в залежності від ідеалізації матеріалу повинні використовуватися рівняння стану для матеріалу з стаціонарною поверхнею міцності /металеві конструкції, квазіоднорідні залізобетонні конструкції/, рівняння стану, що урахують внутрішню тертя /бетонні та кам'яні конструкції, бетонні

елементи залізобетонних конструкцій, а також рівняння стану для перетинів нелінійно-непружних стержнів. За розрахункову схему пластинкової конструкції приймається ансамбль скінчених елементів, напружено-деформований стан у яких є однорідним. Такий вид розрахункової схеми зумовлен тим, що історія довільного складного навантаження повинна бути надана в точках конструкції, в місцевості яких існують однорідні поля напружень та деформацій. В цьому зв'язку очевидною ефективністю для розв'язування нелінійних задач методу розподілу параметрів в формі алгоритму /9/. Припускаємо цим алгоритмом схема обчислювання може трактуватися як суперелементна з вироджуванням суперелемента до первинного скінченного елемента. При цьому обсяг інформації про жорсткісні характеристики системи, що складається з інформації про матриці жорсткості окремих скінчених елементів, являється, очевидно, мінімальним із всіх проможних суперелементних моделей. В зв'язку з визначеною специфікою роботи ґрунтової основи /односторонній в'язь з основою/ для його моделювання виділяється стержень спеціального типу. Робота ґрунтової основи на зсув моделюється стержнем основного типу. Оскільки міцнісні характеристики такого стержня залежать від рівня тиску на основу, вводиться уявлення про сполучені стержні. Зокрема для стержня, що моделює роботу основи на зсув, сполученням являється стержень, що моделює роботу основи на стиск. Інформація про напруження в сполученому стержні використовується для перевизначення міцності стержня, що моделює роботу на зсув. Такий комплексний скінчений елемент можна розглядати як стержневу модель трикутного скінченного елемента, рівняння пластичного стану для якого складені з урахуванням внутрішнього тертя. Використання стержней для моделювання роботи ґрунту продиктовано прикладженням до нормативної бази, заснованої на моделях коефіцієнтів жорсткості основи. Аналогічний підхід використовується для моделювання роботи швів та стиків збірних конструкцій, міцність яких залежить від рівня обтиску.

Відзначеною особливістю обмірковуємих в дисертації алгоритмів є урахування довільних траєкторій навантаження в просторі деформації. При цьому параметри траєкторії навантаження в скінчених елементах наперед невідомі, а обчислюються в процесі поетапного розв'язування задачі про складне навантаження конструкції. Параметри траєкторії навантаження запам'ятовуються в оперативних масивах та чинять вплив на розподіл напружень та деформацій при реалізації рівнянь пластичного стану. Склад та розміри оперативних масивів, при-

значених для запам'ятування параметрів траєкторії навантаження, визначаються типами рівнянь пластичного стану, що використовуються при розрахунку конструкції. Рівняння стану типу Д /1...5/ потребують для своєї реалізації наступну інформацію про траєкторію навантаження, що запам'ятається в оперативних масивах $4 \times M$ / M -кількість елементів в системі/: EA, SA - тензори повних деформацій та напружень в останній точці розвантаження /точка А/; EB, SB - тед, на передостанньому ступені навантаження /точка В/; EC - тензори повних деформацій на розглядаємому ступені навантаження /точка С/; EAT, SAT -тікучі значення масивів EA та SA . При розрахунку на розглядаємому ступені навантаження масиви EA, SA, EB, SB являються незмінними. Масив EC коректується з урахуванням поправок до перемішень вузлів системи, що обчислюються в процесі ітерації Ньютонa. В масиви EAT, SAT вноситься інформація про тікучі координати точки розвантаження після кожного звернення до підпрограми, що реалізує рівняння пластичного стану. Таким чином координати точки розвантаження для наступного ступеню навантаження вироблюються рівняннями пластичного стану в процесі ітерації Ньютонa на розглядаємому ступені навантаження. Після завершення розрахунку на кожному ступені навантаження учиняється перевизначення масивів, що описують траєкторію навантаження:

$$EA = EAT; SA = SAT; EB = EC; SB = SC, \quad /16/$$

де SC - масив тензорів повних напружень на розглядаємому ступені навантаження /точка С/.

Цілковито очевидно, що з зменшенням величини ступеню навантаження підвищується точність обчислювання траєкторій навантаження в скінчених елементах. Таким чином при використуванні рівнянь стану типу Д історія довільного складного навантаження цілком визначається п'ятьором масивами розмірами $4 \times M$, при цьому обсяг інформації про траєкторію навантаження не залежить від кількості ступенів навантаження.

Інформація про траєкторію навантаження змінюється за видом, якщо рівняння стану типу Д використовуються для матеріала, що має внутрішню тертя /нестационарна поверхня міцності/. При цьому, як правило, урахується нелінійна стислість матеріалу та ділатансія. Для запам'ятання параметрів траєкторії навантаження в цьому випадку використовується два масиви, один з яких трьохмірний розмірами $4 \times M \times L / L$ - кількість ступенів навантаження/, а другий двомірний розмірами $M \times L$: E - тензори повних деформацій в скінчених еле-

ментах на ступенях навантаження; MM - ознаки точок розвантаження в скінчених елементах на ступенях навантаження. Другий масив з'являється обов'язковим тільки при аналізі плоского напруженого стану, тому що зміна коефіцієнта Пуассона в процесі навантаження може доводити до перекручування траєкторії в просторі деформації. Елементи масивів E та MM коректуються при кожному зверненні до підпрограми, що визначає напруження в скінченому елементі. Інформація про історію навантаження при реалізації рівнянь пластичного стану використовується таким чином. Обчислюються середні деформації на ступенях навантаження від першого до розглядаемого ступеня. Для цього використовуються тензори деформації з масива E . Для нашої історії навантаження в середніх деформаціях обчислюється середнє напруження в скінченому елементі на розглядаемому ступені навантаження. При урахуванні ділатансії в указаних обчисленнях використовується величина інтенсивності напружень з інформації, що міститься у масиві SC /ця інформація в процесі виконання ітерації Ньютона постійно оновлюється/. В залежності від середнього напруження по діаграмі міцності визначають радіус гіперсфери міцності для матеріалу скінченого елемента. З масива E послідовно виймають інформацію про деформації в точках A, B, C траєкторії навантаження /див. вище/ та визначають фіктивні напруження на ступенях навантаження з використанням рівнянь стану типу D . При цьому існує повна аналогія з відміченим вище застосуванням цих рівнянь для матеріалу з стаціонарною поверхнею міцності, включаючи перевизначення параметрів історії навантаження типу /16/. Відзначає полягає тільки в тому, що напрям навантаження визначається на останньому /розглядаемому/ ступені навантаження, а на всіх попередніх ступенях координати точки розвантаження устанавлюються по інформації, що виймається з масива MM . Визначені таким чином напруження для розглядаемого ступеня навантаження є дійсними /в відношенні від фіктивних для всіх попередніх ступенів навантаження/. Ці напруження використовуються для коректування масива SC . Реалізація алгоритму /9/ припиняється, якщо по напрямку всіх степенів воєї системи нерівновадні реакції в вузлах не перевищують припустиме наперед задане значення.

Виконані чисельні дослідження конструкції, що підлягають складному навантаженню. На прикладі дослідження діяння багаторовневих перехосів стінових панелей в будинках на неоднорідно деформо-

ванях основах установлена деформаційна спроможність об'єктів конструкцій стін та проілюстрована порівняльність одержаних результатів з даними натурних досліджень. Показано, що урахування роботи ґрунту на зсув суттєво впливає на розподіл зусиль в конструкціях на пружній основі при багаторазових навантаженнях. При цьому максимальні зусилля на ступенях навантаження досягаються ні в процесі навантаження, а під час розвантаження. В цілому урахування роботи ґрунту на зсув зміншує розрахункові зусилля в зігнутих конструкціях на пружній основі на 20...30 %.

Виконан порівняльний аналіз осідань 9-ти поверхового експериментального житлового будинку при утворенні в його основі уступів висотою до 130 мм, наданих штучним засобом по спеціальній програмі. При розгляданому діянні ґрунтова основа підлягає багаторазовим реверсивним навантаженням, в т.ч. відриву від фундаментів та відновленню з ним контакту. Збільшення жорсткості основи в наслідок змінних навантажень доводить до розширення зон відриву фундаментів від основи. При цьому консолювання будинку в зоні уступу супроводиться лійно подібним консолюванням з протилежного боку. На підставі цього робиться висновок про несприятливий вплив складного навантаження ґрунтової основи на роботу конструкції верхньої будівлі.

Проаналізована схема руйнування стіни великочлочного будинку при діянні уступу в основі. Дані чисельного аналізу порівнюються з результатами натурних випробувань житлових будинків сврії 87 /Горлівка, 1986/. Установлено, що найбільш імовірною схемою руйнування таких будинків є їх розшарування по поверхам за рахунок зменшення тиску в горизонтальних розчинних швах та, як наслідок, втрати останніми несучої спроможності на зсув.

Результати порівняння теоретичних та експериментальних даних свідчать про доцільність застосування для оцінки граничних станів першої групи конструкцій, що підлягають складним навантаженням, деформаційних критеріїв. В розгляданому випадку такими критеріями є припустимі величини зсуву та розкриття швів в роздільних швах об'єктів конструкцій. Для звичайних умов експлуатації значення указаної величини, що нормується, складає 1 мм. Для особливого сполучення навантажень, що включає вплив підземних гірничих виробок, застосовуються розширені деформаційні критерії, згідно з якими зсуви в горизонтальних швах можуть досягати величини 3 мм. Як кон-

структура міра захисту, що виключає розшарування стіни велико-блочного будинку по поверхам при діянні уступу в основі, запропонована система вертикальних "язев" між сбірними конструкціями, що установлюється в кутах перетину поздовжніх та поперечних стін на висоту 2-3 поверхів. Таке конструктивне рішення надає фундаменту в сполученні з стіною якість монолітної конструкції, що підтверджується даними натурних випробувань.

Деякі результати досліджень, що стосуються пластинково-стержневих систем на пружній основі, винесені у додаток. Зокрема, проаналізована робота зігнутої залізобетонної конструкції фундаменту, розрахункова схема якої вмикає трикутні бетонні елементи та стержневі арматурні елементи. Для бетону прийняті рівняння стану, що ураховують внутрішнє тертя, а також утворення, розкриття та закриття псевдотріщин. Показано, що просте навантаження по зовнішньому фактору доводить до складних траєкторій навантаження в точках конструкції. Зокрема, просліджена історія утворення нахилої тріщини в стислій зоні бетону в січenni, що опірне. Відзначається вплив розпірного ефекту при згині залізобетонної конструкції, а також вплив виду напруженого стану /плоский напружений стан, плоска деформація/ на несучу спроможність конструкції. Одержані результати порівнюються з нормативним уявленням теорії залізобетону.

В цьому розділі поміщені результати досліджень довільних стержневих систем на пружній основі. В основу розрахунку стержневих систем на пружній основі при складних видах навантаження покладені рівняння стану, що запропоновані в другому розділі, та алгоритм методу розподілу розривних переміщень /Ц/. Рівняння стану, що використовуються, складені таким чином, що параметрами історії навантаження є зусилля. При цьому історія навантаження в деформаціях не запам'ятується. В зв'язку з цим складні багатопараметричні навантаження можуть аналізуватися тільки з використанням зовнішніх ітерацій, в яких черговим приближенням є точне рішення задачі при фіксованих значеннях впливаючих параметрів в розрахункових перетинах системи. Чисельними дослідженнями плоских залізобетонних рам на деформованій основі виявлено, що збіжність зовнішніх ітерацій по такому впливаючому параметру як поздовжня сила в перетині досягається за 1-3 зовнішню ітерацію. Рівняння стану та рекурентні розрахункові формули /Ц/ записані для локальних систем координат стержневих скінчених елементів. В зв'язку з

цим їх застосування для довільних систем сполучено з необхідністю виконання формальних перетворень при зміні систем координат.

Проведені експериментальні дослідження плоских рам з збірних залізобетонних конструкцій в натурну величину по серіям 1.420-12, 1.020 та "донецький каркас". Конструкції підлягали складному навантаженню силовими та деформаційними діями.

Результати експериментальних та розрахунково-теоретичних досліджень свідчать про значну прилаштовуваність залізобетонних рам з конструкції по серії 1.420-12 до нерівномірних осідань основи. Руїнування балок /крижкє руїнування бетону стислих зонн чи розрив розтягнутої арматури/ спостерігались при нерівномірних осіданнях їх опір в межах 15-20 см. При відносному нерівномірному осіданні опір, що не припадає 0,01, ширина розкриття тріщин в балках досягає величини 0,35-0,5 мм. Таким чином каркасні будівлі з конструкції серії 1.420-12 можуть будуватися на підвиробкових територіях III, IV, IVк груп та на осідальних ґрунтах III, IV групи умов будівництва, як правило, без конструктивних мір захисту від впливу нерівномірних осідань основи. Реалізація цих висновків дозволяє зменшити кошторисну вартість будівництва каркасно-панельних будинків в складних гірничо-геологічних умовах від 5 до 25 %.

Складний характер навантаження залізобетонних перетинів доводить до збільшення інтегральної жорсткості рамної системи та, як наслідок, до зменшення її деформаційної спроможності /прилаштовуваності до нерівномірних осідань основи/.

В шостому розділі досліджуються ґрунтові масиви, що підлягають складним видам навантаження. Вихідними даними для розрахунку ґрунтового масиву являються навантаження від розташованої на ньому споруди, власна вага масиву, а також деформації земної поверхні від впливу підземних гірничих виробок, які надаються на рівні контакту коріних порід з наносами. Як діяння розглядаються також процеси, що пов'язані з зміною фізико-механічних властивостей ґрунтів, складаючих масив, наприклад, внаслідок замкання осідальної товщі. До спеціальних видів діяння відносяться також явища перерозподілу напружень в ґрунтовому масиві, викликані технологічними процесами, наприклад, проходженням виробок, установкою крені та т.п. Всі указані діяння являються складними, тому що їх аналіз не можна виконати з використанням принципу суперпози-

ції. Поміщені в шостому розділі результати досліджень засновують-ся на рівняннях пластичного стану, запропонованих в другому розділі. При цьому урахуються нелінійні залежності між напруженнями та деформаціями при складному навантаженні, в т.ч. внутрішнє тертя для нелінійних діаграм міцності, нелінійне ущільнення для середніх напружень, що перевищують структурну міцність ґрунту, ділатансія, а також деформована схема ґрунтового масиву. Розв'язування нелінійних задач здійснюється методами, запропонованими в третьому розділі. Розглядається ґрунтовий масив в умовах плоскої деформації та осесиметричної деформації /просторова задача/. При цьому використовується розрахункова схема у вигляді системи трикутних скінчених елементів, кожний з яких знаходиться в однорідному напружно-деформованому стані. Для загального випадку просторової задачі рекомендується використовувати розрахункові схеми у вигляді системи тетраедричних скінчених елементів, напружно-деформований стан в яких також однорідний. При цьому рівняння стану для тетраедричного скінченого елемента приймають найбільш просту форму, тому що в них відсутній коефіцієнт поперечної деформації, що залежить від рівня напруженого стану.

Проаналізований напружно-деформований стан ґрунтового масиву при багаторазовому впливі підземних гірничих виробок. Характерною особливістю ділянки горизонтальних деформацій коріних порід являється суттєве зміння осідань поверхні ґрунтового масиву. Розтягнення ґрунтового масиву викликає додаткові осідання його поверхні, а стиск-підйом. Указане явище в нормативних уявленнях про процес зсуву земної поверхні це ураховується. Зміння осідань поверхні ґрунтового масиву внаслідок впливу горизонтальних деформацій коріних порід носить нерівномірний характер та доводить до додаткового скривлювання поверхні. Це пояснюється тим, що додаткові осідання завантаженої поверхні ґрунтового масиву суттєво відрізняються від відповідних осідань незавантаженої поверхні. Кривизна завантаженої поверхні, що обумовлена горизонтальними деформаціями, алгебрично підсумовується з кривизною, обумовленою вертикальними зсувами гірничого масиву, визначеною маркшейдерським прогнозом.

При цьому результат такого підсумовування може суттєво впливати на розрахункову кривизну завантаженої поверхні, аж до зміни її знака в порівнянні з маркшейдерським прогнозом. Натурні прояви, що мають указану природу та не узгоджуються з маркшейдерськими уявлен-

нями, описані в ряді досліджень по Карагандинському вугільному басейну. Таким чином кривизни завантаженої та незавантаженої поверхні при тих самих параметрах зсуву земної поверхні можуть корінім образом відрізнятись. Закономірність скривлювання поверхні ґрунтового масиву суттєво залежить також від історії навантаження, зокрема, від знакозмінного характеру горизонтальних деформацій корініх порід. Досліджено вплив на величину поздовжніх сили в центральному перетині гнучкого фундаменту відносної глибини ґрунтового масиву та величини середнього тиску по подошві фундаменту. При відносній глибині ґрунтового масиву, більш чим одиниця, поздовжні сили в фундаменті від горизонтальних деформацій розтягу та стиску практично збігаються /по абсолютній величині/ та залишаються на 30% менше величини, що прогнозується нормами. Якщо відносна глибина масиву прямує до нуля, поздовжня сила від горизонтальних деформацій розтягування практично збігається з величиною, що прогнозується нормами, а поздовжня сила від горизонтальних деформацій стиску перевищує указану величину на 50%.

Змінення поздовжньої сили в фундаменті при зростанні тиску по подошві залежить від знака горизонтальних деформацій корініх порід. При горизонтальних деформаціях розтягування з рiстом тиску поздовжня сила також зростає. При горизонтальних деформаціях стиску указана закономірність дотримується до тиску 0,3 МПа, після чого рiст тиску супроводжується зменшенням абсолютної величини поздовжньої сили. Останнє пояснюється утворенням під фундаментом при діянні горизонтальних деформацій стиску ущільненого ядра, міцність якого з рiстом тиску зростає, в зв'язку з чим руйнування ґрунтового масиву відбувається за рахунок випору незавантаженої поверхні.

Доведені результати експериментальних досліджень фрагментів стрічкових фундаментів на природній основі, що задовільно узгоджуються з теоретичними оцінками. Експериментально устанавлено, що зміни навантаження природної основи супроводяться розвитком повторних пластичних деформацій, величина яких при наближенні до граничного стану суттєво зростає. Останнє узгоджується з прийнятими теоретичними засновками. В шостому розділі доводяться також результати дослідження складного навантаження ґрунтових масивів при відмінних видах напруженого стану, досліджується перерозподіл напружень при розв'язуванні ряду технологічних та техногенних задач. В додат-

ку надається приклад проектування штучної основи при будівництві споруд метрополітену в м.Донецьку.

В додатку 1 поміщені методичні рекомендації по розрахуванню пластинково-стержневих конструкцій та ґрунтових масивів за допомогою розробленого автором програмного комплексу *КОНТАКТ*.

В додаток 2 винесені матеріали, допоміжні до другого розділу, що стосуються аналітичних та геометричних уявлень рівнянь пластичного стану при складних навантаженнях. В додатку 3, що є доповненням до третього розділу, аналізуються особливості чисельної реалізації рівнянь пластичного стану при розв'язуванні систем нелінійних рівнянь рівноваги та нерозривності переміщень. В додатку 4 в доповнення до четвертого та шостого розділів приміщені приклади розрахунків будівельних конструкцій та основ для робочого проектування. В додатку 5 надаються свідки про використання результатів роботи та досягнену техніко-економічну ефективність.

Основні висновки проведених досліджень приміщені в закінченні. Серед них можна відзначити наступні:

1. Складні навантаження будівельних матеріалів та ґрунтів супроводяться, як правило, суттєвим проявленням ефекту Баушинґера; в зв'язку з чим для їх аналізу неприйнятні теорії пластичної течії, в яких поверхні навантаження постульовані як поверхні обертання. В зв'язку з цим рекомендується використовувати для розрахунку конструкцій та основ, що підлягають складним діям, запропоновану автором деформаційну теорію пластичності складних навантажень матеріалу з внутрішнім тертям та метод визначення фіктивної міцності матеріалу в рівняннях Москвитина при довільних траєкторіях навантаження в просторі деформації.

2. Траєкторії навантаження в просторі напружень складним чином співвідносяться з траєкторіями навантаження в просторі деформацій. При цьому, як правило, спостерігається розподження видів напруженого та деформованого стану і розбіжність осей головних напружень та деформацій. Тому не рекомендується використовувати для аналізу складних навантажень рівняння стану, що засновані на гіпотезах про збіжність осей головних напружень та деформацій, наприклад, ортотропні моделі. Використання зазначених рівнянь наводить для деяких траєкторій до зникнення додатної визначеності матриці Фреше за рахунок від'ємності елементів на її головній діагоналі, до розривів функції реакції та їх похідних і до інших

некоректності фізичного характеру. Наслідком цього являється розбіжність ітераційних процесів навіть при аналізі простих навантажень, тому що в процесі ітерації моделюються навантаження по різних траєкторіям.

3. Некоректними являються спроби постулювати діаграму зсуву матеріалу при розвантаженні. Для траєкторії, при яких змінюється фіктивна міцність матеріалу в процесі навантаження, спостерігається розривність в постульованих діаграмах зсуву. Наслідком цього являється немонотонний змін функції реакції на монотонних траєкторіях навантаження. Останнє може наводити до зникнення локальної області збіжності ітераційного процесу за рахунок виродження елементів матриці Фреше. В цьому разі рекомендується обчислювати діаграми зсуву при розвантаженні в процесі розв'язування задачі про складне навантаження матеріалу, використовуючи як додаткові умови нерозривності функції, що визначають ці діаграми. Чисельними дослідженнями проілюстрована діаграма зсуву при розвантаженні стислої зони залізобетонної балки в зв'язку з утворенням нахилої тріщини.

4. Для матеріалів, що мають внутрішнє тертя /грунти, бетони і т.п./, зміна в процесі навантаження середнього напруження наводить до порушення колінеарності векторів прирісень зсувних напружень та деформації. При цьому відхилення вектора прирісень зсувних напружень обумовлено компонентом-вектором, модуль якого залежить від прирісень середнього напруження, а напрям збігається з напрямом вектора повних зсувних напружень. Цей висновок є наслідком запропонованої автором теореми про складне навантаження матеріалу з внутрішнім тертям, що установлює адекватну відповідність між рівняннями деформаційної теорії і теорії пластичної течії середовища, яке зміцнюється.

5. Дослідженнями складних траєкторії навантаження матеріалів, що ділатують /піщані та крушновідламкові ґрунти, бетони і т.п./, установлено, що урахування ділатансії може коректно здійснюватися в рамках деформаційної теорії з використанням параметричної сім'ї діаграм ущільнення. При цьому в зв'язку з невизначенністю параметра /зсувного напруження/ виникає неголономність рівнянь стану, яка повинна розв'язуватись ітераційним методом. Аналогічна ситуація виникає при аналізі плоского напруженого стану, коли неголономність рівнянь стану обумовлена невизначенністю коефіцієнта поперечної деформації. По цій причині плоский напружений стан є найбільш складним

видом напруженого стану в нелінійному аналізі. Рекомендується для підвищення ефективності обчислювальних алгоритмів сполучити ітераційні процеси по розв'язуванню неголономних рівнянь стану і розкриття кінематичної /статичної/ невизначеності системи.

8. Процес утворення, розкриття та закриття псевдотріщин при складному навантаженні рекомендується враховувати з використанням трансформованих в процесі розрахунку діаграм міцності і ущільнення матеріалу. Як основна гіпотеза при цих трансформаціях приймається, що після утворення псевдотріщини октаедричне счеплення матеріалу набуває нульового значення. Нульового значення набуває також опір матеріалу тривісному розтягу. Відомі труднощі пов'язані з аналізом ступеню навантаження, на якому утворюється псевдотріщина, тому що реалізація цієї події установлюється тільки на кінці ітераційного процесу. Невідповідність, що виникає при утворенні псевдотріщини, між діаграмою міцності і діаграмою ущільнення рекомендується усувати використанням як параметра діаграми міцності середнього напруження, визначаемого по фіктивній діаграмі ущільнення, що не враховує утворення псевдотріщини. Рекомендується тут процедура апробована в чисельних дослідженнях тріщиноутворення в ґрунтових масивах та бетонних конструкціях.

7. В залежності від повноти вихідної інформації про систему, що розраховується, а також цілей аналізу рекомендується застосовувати, поряд з складними, спрощені, в т.ч. стержневі ідеалізації ґрунтових основ та будівельних конструкцій. Автором запропоновані принципи побудови рівнянь стану перетинів стержньових елементів при складних траєкторіях навантаження на підставі параметричних уявлень діаграм деформування /згину, розтягу-стиску, зсуву/. Запропоновані комбіновані стержньові моделі, що дозволяють аналізувати складне навантаження матеріалу з урахуванням внутрішнього тертя. З використанням цих моделей виконан аналіз руйнування стіни великоблочної будівлі в наслідок зниження стислих напружень в розчинних шарах і зменшення їх міцності на зсув. Результати теоретичного аналізу якісно і кількісно підтверджені даними натурних випробувань. Проілюстрован суттєвий вплив на напружений стан балок на деформуємої основі опору ґрунту зсуву, що залежить від контактних напружень.

8. Результати нелінійного аналізу рекомендується оцінювати по граничним станам, що характеризуються деформаційними критеріями. Перевагу слід надавати узагальненим деформаційним критеріям, таким,

наприклад, як інтенсивність повних деформацій, кривина нейтральної осі і т.п. Ці рекомендації набувають принципового значення для конструкції на деформуємій основі, експлуатаційна згідність яких може бути встановлена виключно з використанням деформаційних критеріїв що характеризують граничні стани як першої так і другої групи. Виконан аналіз статистичної забезпеченості деформаційних критеріїв граничних станів і на підставі результатів експериментальних досліджень показана ефективність їх використання для оцінки результатів розрахунку конструкції та основ на складні види навантаження.

9. Сформульовані принципи розподілу параметрів в деформуємих системах та запропоновані узагальнені методи розподілу параметрів для статичного аналізу нелінійних систем при складних видах навантаження. Рекурентна форма алгоритмів приладнана до використання рівнянь стану довільного вигляду, в т.ч. в формі обчислювальних процедур. Показано, що математичним аналогом запропонованих алгоритмів є ітераційні процедури типу Ньютон-ІВР, що мають квадратичну швидкість збіжності.

10. Область локальної збіжності узагальненого методу розподілу параметрів спадається з тою, що є для методу Ньютон. Умови існування локальної області збіжності в методі Ньютон, що визначаються теоремою Ортегі, виконуються для розглядаємих в дисертації задач використанням двічі диференційованих рівнянь стану. Збіжність ІВР-ітерацій забезпечується симетричністю та додатною визначеністю матриці Фреше. По цій причині рекомендується перед початком ітерацій виконувати симетризацію матриць жорсткості скінчених елементів, яка може зникати внаслідок накопичення обчислювальної помилки. Практичне розв'язування задачі досягається завжди, якщо ступені навантаження є достатньо малими.

11. Установлено, що витрати машинного часу при реалізації узагальненого методу розподілу параметрів лінійно залежать від кількості степеней волі системи. Це свідчить про ефективність запропонованого методу в порівнянні з методом пружних рішень, для якого указана залежність є квадратичною. Реалізація узагальненого методу розподілу параметрів не потребує складання матриці жорсткості системи що наводить до економії пам'яті ЕОМ в порівнянні з реалізацією методу пружних рішень, в зв'язку з чим розширюється клас практично

розв'язуємих задач.

12. Серед проблемних питань, пов'язаних з подальшим розвитком теорії складного навантаження будівельних конструкцій і основ, необхідно виділити розробку стохастичних моделей, в яких запропонована теорія складає детерміністичну частину.

Основні положення дисертації опубліковані в роботах:

1. Исследование некоторых гипотез сложного нагружения // Строит. механика и расчет сооружений. - №3. - М.: Стройиздат, 1992. - с. 30-36.

2. Применение деформационной теории пластичности для анализа сложных нагружений // Строит. механика и расчет сооружений. - № 2. - М.: Стройиздат, 1984. - с. 13-18.

3. Решение нелинейных задач методом распределения усилий и перемещений // Строит. механика и расчет сооружений. - № 4. - М.: Стройиздат, 1982. - с. 16-20.

4. Исследование некоторых итерационных алгоритмов. - Материалы XIII Международной конференции по бетону и железобетону // НТБ "Бэтэком". - М.: Стройиздат, 1992. - с. 326-327.

5. О критериях предельного состояния железобетонного сечения. Тез. докл. республ. н-т. Конф.: Совершенствование железобетонных конструкций, работающих на сложные виды деформации, и их внедрение в строительную практику. - Полтава, 1989. - с. 150-151.

6. О некоторых гипотезах сложного нагружения. - Материалы XIII Международной конференции в области бетона и железобетона. - М.: НТБ "Бэтэком", 1991. - с. 323-324.

7. Расчет каркасных зданий на неравномерно деформируемых основаниях по предельным перемещениям конструкций. - Сб. докладов Балтийской конференции по механике грунтов и фундаментостроению. - Таллин, 1988. - с. 62-69.

8. Расчет пространственных рам на воздействие деформации земной поверхности // Строит. механика и расчет сооружений. - №6. - М.: Стройиздат, 1985. - с. 17-20.

9. Решение нелинейных задач строительной механики методом распределения параметров. - В сб.: Автоматизация инженерных расчетов в строительном проектировании. - Л., 1985. - с. 57-69.

10. *Structural design of industrial buildings to be erected*

in mining areas with complicated geological conditions. - ICB-Symposium on complex approach to the solution of the problems in design and construction industrial buildings and enterprises. - USSR, Yerevan, September, 15-24, 1980, p. 49-56.

11. Расчет плоско-пространственных пластинчатых систем совместно с грунтовым основанием на воздействие переменных нагрузений. - В кн.: Эффективные конструкции и методы расчета несущих систем, элементов узлов бескаркасных зданий: Тез. докл. Девятого коорд. совещ., Вильнюс, 1984, с. 142-144 /співавтор С.М. Клепиков/.

12. Определение необходимости защиты каркасных сооружений от влияния горных выработок // Промышленное строительство и инженерные сооружения. - №1. - Киев: Будівельник, 1983. - с. 31-32.

13. Некоторые особенности расчета подрабатываемых каркасных зданий. - В кн.: Строительные конструкции: Респ. межвед. Н-Т. сб. - Киев, 1971, вып. XVIII, с. 175-181.

14. Расчет многоэтажных зданий на неравномерно деформируемых основаниях по предельным перемещениям конструкции /Тез. докл. XIV Н.-П. совещания-семинара: конструктивные формы и методы расчета многоэтажных зданий в условиях вечной мерзлоты и сейсмики. - Иркутск. - 1988. - с. 19-20.

15. Экспериментальные исследования длительной деформативности глинистых грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. - №1. - №.: Строиздат, с. 30-33 /співавтор В.Е. Макієнко/.

16. Определение касательных нагрузок по подошве фундаментов многократноподрабатываемых зданий. - В кн.: Фундаменты и подземные сооружения. - Киев, 1976. - с. 149-159 /співавтор В.Е. Макієнко/.

17. Расчет фундаментов многократноподрабатываемых зданий. - В кн.: Проектирование оснований и фундаментов промышленных зданий и сооружений: Сб. тр. с. 89-100 /співавтор В.Е. Макієнко/.

18. Конструктивные решения производственных зданий, возводимых на подрабатываемых территориях со сложными горно-геологическими условиями // Промышленное строительство. - №8. - М.: Строиздат, 1980. - с. 26-28 /співавторы Ю.Л. Бучинський, М.А. Коваленко/.

19. Исследование сложного нагружения балок-стенки на неупругом основании. - В кн.: Эффективные железобетонные конструкции зданий и

сооружения для строительства в обычных и сложных условиях и контроль их качества.-М.: НИИДБ Госстроя СССР.-1985.-с. 105-116 /співавтор С.М. Клепиков/.

20. Экспериментальные исследования глинистого грунта при сложном нагружении.- В сб.: Проектирование и строительство заглубленных в грунт сооружений и конструкции.-Киев.- 1987.- с. 17-24 /співавтор Ю.С. Горбанов, С.М. Клепиков/

21. Строительство и защита жилых и гражданских зданий на подрабатываемых территориях.-Киев: Будівельник.-1981.- 104 с. /співавтор Д.А. Мілюков/.

22. Рекомендации по расчету многократно подрабатываемых зданий и сооружений на воздействие деформации земной поверхности с учетом геологических свойств грунтов основания.-Донецк: Ротапринт Донецкого ЦНИИП.- 1977.- 60 с. /співавтор В.Е. Макієнко/.

23. Рекомендации по расчету грунтовых оснований подрабатываемых зданий и сооружений.- Донецк: Ротапринт Донецкого ЦНИИП.- 1984.- 88 с.

24. Рекомендации по расчету пространственных систем зданий и сооружений на подрабатываемых территориях.-Донецк: Ротапринт Донецкого ЦНИИП.- 1984.- 87 с.

25. Методические рекомендации по расчету пластинчато-стержневых конструкций с помощью программного комплекса КОМТАКТ .--Донецк: Ротапринт Донецкого ЦНИИП.- 1992.- 102 с.

Подписано к печати 12.05.94г.

Формат бумаги 60 х 90/16.

Объем 1,5 п.л. Заказ №41, тир. 120.

Бесплатно.

Ротапринт Донецкого Промстройниипроекта

457997

AB 30.442