

КИЇВСЬКИЙ ІНЖЕНЕРНО-БУДІВЕЛЬНИЙ ІНСТИТУТ


На правах рукопису

ПЕРМЯКОВ
Володимир Олександрович

ВДОСКОНАЛЕННЯ СТАЛЬНИХ СТЕРЖНЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ
НА БАЗІ РОЗВ'ЯЗАННЯ УЗАГАЛЬНЕНОЇ ЗАДАЧИ
ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Спеціальність 05.23.01 - будівельні конструкції,
будівлі та споруди

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук



Київ - 1993

№ 27.30

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00743260 (M)

сталевих та дерев'яних конст-
рукційного інституту

корреспондент АН України
технічних наук

Л.М.ЛОБАНОВ

доктор технічних наук, професор

А.В.СІЛЬВЕСТРОВ

доктор технічних наук,

А.В.ПЕРЕЛЬМУТЕР

Провідна установа: Київський Зональний науково-дослідний Інститут експериментального проектування /КиївЗНДІЕП/

Захист відбудеться " 11 " 06 1993 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 068.05.02 Київського інженерно-будівельного інституту за адресою: 252037, Київ-37, Повітрофлотський проспект, 31.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Київського інженерно-будівельного інституту.

Автореферат розісланий " 4 " 05 1993 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
к.т.н., с.н.с.

КОБІЄВ В.Г.

ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стальні стержневі конструкції знайшли широке застосування в практичному будівництві завдяки відомим перевагам, які визначаються перш за все високими міцнісними властивостями матеріалу, індустріальністю виготовлення і монтажу. Їх вдосконалення, що направлено на зниження матеріаломісткості конструкцій шляхом зменшення витрат сталі на сприйняття навантажень, провадиться різними шляхами, серед яких особливе місце належить вибору конструктивного рішення, яке б забезпечувало при безумовній відповідності технологічному призначенню об'єкта, що проектується, раціональне використання матеріальних, трудових і часових ресурсів на всіх стадіях створення конструкції.

Пошук оптимальних конструктивних форм сталених конструкцій пов'язаний з розвитком методів оптимального проектування, за допомогою яких вдається досягнути потрібних техніко-економічних показників конструкцій. Проте відомі розв'язання задач оптимізації і розроблене на їх основі програмне забезпечення, в тому числі наявні у складі САПР, орієнтовані, як правило, на проектування конкретних об'єктів, що, наприклад, для типових конструкцій дозволяє знизити матеріаломісткість і вартість на 10-12%. Подібний підхід актуальний і для споруд, досвід проектування яких обмежений, а наявні реалізовані аналоги відрізняються індивідуальними особливостями, що стримують можливості узагальнення, характерного для об'єктів масового виготовлення. Відсутність в сучасній практиці проектування універсальних підходів до оптимізації конструкцій, незалежних від їх призначення, пояснює обмежене використання методів оптимального проектування, переваження евристичного характеру вибору конструктивних форм і геометричних розмірів конструкцій, що призводить до невиправданої перевитрати матеріалів і збільшує вартість будівництва.

Метою цієї роботи є розробка узагальненого методу оптимального проектування сталених стержневих конструкцій і вдосконалення на його основі конструктивних форм, які забезпечують заощадження коштів на їх зведення.

Досягнення постановленої мети здійснюється на основі рішення наступних задач:

- обґрунтування і формулювання задачі пошуку оптимальних параметрів напружено-деформованого стану і геометричних схем сталених стержневих конструкцій за умовою мінімізації детермі-

нованої цільової функції і наявності нелінійних обмежень;

- розробка універсального алгоритму і програмного забезпечення методу оптимального проектування конструкцій з геометрією, що варіюється з врахуванням оптимальної компоновки поперечних перерізів елементів;

- числове дослідження оптимальних параметрів геометричних схем плоских і просторових стержневих конструкцій з врахуванням їх специфічних властивостей і визначення особливостей формування конструктивних форм на прикладах наскрізних конструкцій покриттів, комбінованих вантових систем, опорних частин морських стаціонарних платформ;

- аналіз оптимальних конструктивних рішень опорних блоків морських стаціонарних платформ і розробка на цій основі нових ефективних конструкцій, що забезпечують зниження матеріальних і трудових витрат на їх виготовлення і зведення;

- розробка, теоретичне і експериментальне дослідження нових типів сталобетонних елементів кільцевого перерізу, які використовуються в конструкціях льодостійких морських платформ, і методики їх оптимальної компоновки.

Автор захищає:

- основні положення пошуку оптимальних геометричних схем сталених конструкцій;

- узагальнений метод оптимального проектування плоских і просторових стержневих конструкцій;

- результати числового дослідження геометричних параметрів конкретних конструктивних форм і розроблені рекомендації по їх проектуванню;

- результати дослідження нових конструктивних рішень опорних частин морських стаціонарних платформ підвищеної монтажно-здатності;

- результати теоретичного і експериментального дослідження роботи сталобетонних елементів кільцевого перерізу і інженерний метод їх розрахунку.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що:

- вперше задача оптимального проектування будівельних конструкцій сформульована в загальному вигляді і її окремі випадки охоплюють широке коло питань, що розглядаються при реальному проектуванні;

- вперше розроблена математична модель задачі оптимізації, яка вільна від спрощень, пов'язаних з необхідністю її пристосу-

вання до обраного методу розв'язання;

- запропонований універсальний алгоритм методу пошуку оптимальних параметрів геометричних схем стержневих систем, що дозволяє розглядати задачі практично необмеженої розмірності і адаптується до довільної конструкції, яка може бути апроксимована кінцево-елементною моделлю;

- виявлені особливості формування оптимальних геометричних схем сталених стержневих конструкцій та їх взаємозв'язок з умовами проектування;

- вперше розроблена методика пошуку оптимальної топології стержневих систем, що базується на завданні базового варіанту конструкції з послідовним виключенням з нього елементів, що "вироджуються", та вузлів, що "зливаються";

- розроблена нова методика визначення оптимальних геометричних параметрів комбінованих вантових систем, що базується на поетапній оптимізації з використанням критеріїв раціональності проектування балки жорсткості;

- розроблені нові алгоритми безітераційної компоновки двотаврових сталених та трьохшарових сталобетонних поперечних перерізів при центральному та позацентровому стиску з врахуванням безперервної зміни їх площі в процесі оптимізації системи;

- вперше експериментально виявлений механізм роботи трьохшарового сталобетонного стержня при різних способах передачі на нього осевого навантаження;

- запропоновані нові конструктивні рішення опорних блоків морських стаціонарних платформ, що трансформуються, які забезпечують підвищення берегової готовності конструкцій і скорочення терміну робіт в морі за рахунок їх транспортування з використанням власної плавучості та встановлення на точці влаштування баластировкою внутрішніх заповнених опорних стояків.

Практичне значення роботи полягає в доведенні її результатів до комплексу програм для ЕОМ і практиці проектування сталевих конструкцій різного призначення. Застосування метода оптимального проектування, що розроблений, та рекомендацій по формуванню оптимальних геометричних схем конструкцій знижує їх матеріаломісткість, а також скоротчує терміни проектування, що зрештою прискорює введення в експлуатацію об'єктів будівництва.

Результати роботи і розроблені методи запроваджені в науково-дослідному і проектно-вишукувальному інституті нафтогазо-промислових споруд на континентальному шельфі /НІПШельф,

м. Сімферополь/ і у виробничому об'єднанні "Чорноморнафтогаз" при проектуванні, реконструкції і будівництві ряду морських стаціонарних платформ для Чорного та Азовського морів - рекомендації по виборі конструктивних форм і їх топології, а також методи визначення хвильових навантажень і розрахунку сталевобетонних стержнів кільцевого перерізу; в проектному і науково-дослідному інституті "Укрпроектстальконструкція" /м. Київ/ при проектуванні об'єктів в м. Сімферополі /шифр І7855/ і Нижньому Новгороді /шифр І7522/ - визначення оптимальної топології і геометрії конструкцій покриття; в проектному інституті по проектуванню будівництва атомних електростанцій "Атоменергобудпроект" /м. Київ/ при розробці конкурсного проекту перетворення об'єкту "Укриття" Чорнобильської АЕС в екологічно безпечну систему - оптимізація геометрії комбінованої вантової системи покриття; в Київському інженерно-будівельному інституті - в дипломному проектуванні ряду об'єктів.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на Міжнародному конгресі з легких конструкцій в надземному і промисловому будівництві /Дрезден, 1971/, Міжнародному симпозиумі асоціації по мостах і конструкціях /Москва, 1978/, VI національному конгресі по теоретичній і прикладній механіці /Варна, 1989/, Міжнародній конференції "Зварні конструкції" /Київ, 1990/, II Міжнародній науковій сесії /Ольштин, 1990/, на Всесоюзних конференціях по статичі і динаміці просторових конструкцій /Київ, 1985/, "Комплексне освоєння нафтогазових ресурсів континентального шельфа СРСР" /Москва, 1989/, "Проблеми оптимізації і надійності в будівельній механіці" /Вільнюс, 1988/, "Питання надійності і оптимізації будівельних конструкцій, машин і механізмів" /Севастополь, 1989 і 1991/, "Морські споруди континентального шельфа" /Севастополь, 1989/, на Українських республіканських конференціях по металевих конструкціях /Маріуполь, 1978; Житомир, 1984; Сімферополь, 1988; Київ, 1992/, по прикладній гідромеханіці /Київ, 1987/. "Проблеми комплексної забудови Південного берега Криму" /Сімферополь, 1988/, на засіданні Асоціації кафедр металевих конструкцій вузів СНД /Миколаїв, 1992/, на щорічних науково-технічних конференціях Київського інженерно-будівельного інституту.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані в 59 друкованих роботах, в тому числі монографіях, довідниках і

учбовому посібнику. Отримано 5 авторських свідоцтв.

Обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, семи глав, висновку і списку літератури загальним обсягом 506 стор., в тому числі основного тексту 361 стор., рисунків 73 на 60 стор., таблиць 48 на 27 стор., бібліографії з 427 найменувань на 45 стор.

Окрім експериментальні і числові дослідження, результати яких наведені в роботі, виконані під керівництвом автора за участю канд.техн.наук І.Д.Бєлова, О.М.Ремєннікова, Муваффака Мохаммеда і аспірантів Бу Салех Наї, Л.О.Носової і Г.Л.Шаучквенаса.

ЗМІСТ РОБОТИ

Структура викладення матеріалу визначена змістом дисертації і відповідає логічній послідовності описання проведених досліджень і отриманих результатів. В першій главі приведений аналіз методів, що застосовуються при оптимізації будівельних конструкцій, відмічаються їх особливості, переваги і недоліки. В другій главі обґрунтована і сформульована узагальнена задача оптимального проектування, приведена математична модель в формі задачі нелінійного математичного програмування і узагальнений алгоритм її рішення. Принципи формування універсальних програмних комплексів, призначених для розрахунку і проектування плоских і просторових стержневих конструкцій, представлені в третій главі. З їх допомогою виявлені особливості формування геометрических схем наскрізних конструкцій покрить, комбінованих вантових систем і опорних блоків морських стаціонарних платформ, викладені відповідно в четвертій, п'ятій и шостій главах з врахуванням специфічних властивостей систем, що розглядаються та їх елементів. В сьомій главі приведені результати проектування реальних об'єктів, що виконане запропонованим методом з використанням розроблених рекомендацій, і показана техніко-економічна ефективність запропонованих рішень.

У вступі Обґрунтована актуальність теми дисертації, визначена роль оптимального та автоматизованого проектування в розв'язанні проблеми ефективного використання матеріальних і трудових ресурсів в будівництві, сформульована мета роботи, її наукова та практична значущість.

Глава I присвячена аналізу сучасних робіт в області оптимального проектування будівельних конструкцій, результати якого

дозволили оцінити досягнуті успіхи і намітити перспективні напрямки розвитку методів оптимізації відповідно до практичних потреб. Підкреслено внесок в становлення і розвиток теорії оптимальних систем М.Леві, І.М.Рабіновича, К.М.Хуберяна, К.М.Протасова, Ю.А.Радцига, О.І.Виноградова, роботи яких лягли в основу більшості подальших досліджень.

Сучасний рівень розвитку математики, будівельної механіки і теорії споруд дозволяє розглядати задачі оптимального проектування, поєднуючі розрахунок конструкцій з аналізом прийнятого рішення. Саме такий підхід в 1960 р. було запропоновано Л.Шмідтом /США/, який допустив можливість і довів необхідність формулювання задач проектування у формі задач математичного програмування. Справедливість вибору такої моделі рішення підтверджена багатьма вітчизняними та зарубіжними вченими, тому що вона як найбільше відповідає особливостям процесу проектування, бо описує умови, що вимагаються у формі, що практично не відрізняється від тої, що викладена в нормативних документах. Відзначено внесок М.І.Абрамова, В.М.Альохіна, О.О.Антіпіна, М.В.Бакієва, В.О.Бараненко, В.Б.Барського, Є.І.Белені, Г.Ю.Бельського, М.М.Бердичевського, В.В.Біржольова, В.М.Вахуркіна, О.В.Геммерлінга, Г.О.Геммерлінга, Е.М.Герасімова, В.М.Гордєєва, Е.В.Горохова, Г.І.Гребенюка, М.Л.Грінберга, М.М.Демідова, О.О.Запросяна, І.М.Калініна, Ю.І.Кудішіна, Я.І.Олькова, А.В.Перельмутера, Ю.М.Почмана, М.І.Рейтмана, М.М.Складнієва, М.Д.Сергєєва, Ю.В.Соболева, В.В.Трофимовича, І.С.Холопова, А.П.Чіжаса, А.А.Чіраса, В.М.Шимановського, Г.Я.Эпельцвейга, М.А.Янкелевича, *R.Baldur, J.Ding, M.W.Dobbs, W.S.Dorn, L.P.Felton, L.P.Friedland, J.Koski, O.E.Leij, K.J.Majid, A.Osyczka, S.S.Rao, K.B.Rojiani, M.P.Saka, W.R.Spillers, L.A.Schmit, W.Stadler, C.J.Turkstra, V.B.Venkaya* та ін. в розробку методів оптимізації поперечних перерізів окремих елементів і стержневих систем, геометрія яких фіксована або може варіюватися. В їх розробках в математичні моделі задач оптимізації окрім умов, що описують напружено-деформований стан конструкцій, вводяться і обмеження, які відбивають специфіку конструювання, виготовлення і монтажу, завдяки чому забезпечується можливість практичного використання результатів оптимального проектування.

Постановка та математичне формулювання задач оптимального проектування сталених стержневих систем відрізняються різноманітністю, що обумовлено насамперед критеріями оптимальності, що

розглядаються параметрами, за допомогою зміни яких розшукується кінцевий результат, повнотою опису вимог, що враховуються, а також прийнятими передумовами розрахунку і методів його реалізації. Відзначено, що змінними проектування, що варіюються, в більшості випадків є розміри поперечних перерізів стержнів та зусилля в статично невизначних системах, регулювання яких здійснюється вибором оптимальних жорсткостей окремих елементів і зусиль попереднього напруження. Вказані параметри визначаються роздільно або, що рідше, комплексно, що приводить зрештою до різних за метов та складністю задач. Кількість робіт, в яких за параметри, що варіюються, приймають параметри геометричних схем, досить обмежена внаслідок складності розв'язання таких задач. В той же час зміненням геометричних розмірів конструкції можна впливати на розподіл внутрішніх зусиль як в статично невизначних, так і в статично визначних системах.

Розглядаються методи, що застосовуються при розв'язанні оптимізаційних задач, розробці та вдосконаленню яких присвячені роботи М.В.Банічука, В.А.Баженова, Е.М.Герасімова, В.М.Гордеева, Г.І.Гребеніка, В.І.Гуляєва, Л.В.Канторовича, В.Л.Кошкіна, В.П.Малкова, *Y.S. Arora, D.G. Carmichael, G. Dantzig, R.E. Gomory, E.J. Haug, G. Hadjey, K.J. Majid, J.B. Rosen* та ін. Відзначається, що рівень розробки методів нелінійного математичного програмування дозволяє використовувати їх при розв'язанні практичних задач навіть при наявності невизначеності одержаного результату.

Виконаний аналіз показав, що неузгодженість формулювань задач оптимального проектування, прагнення пристосувати їх математичні моделі до прийнятого методу розв'язання, нарізний пошук тих чи інших параметрів конструкцій не сприяє широкому впровадженню в проектну практику методів оптимізації конструкцій. В зв'язку з чим практичний інтерес являє розробка цільного підходу до проектування конструкцій одного класу, наприклад, стержневих. Під таким підходом розуміється комплексний розгляд всіх параметрів, що здійснюють найбільший вплив на ефективність проектного рішення, подання всіх вимог, що ставляться до конструкції та враховуються при її проектуванні, в вигляді найбільш прийнятним для проектувальника, забезпечення можливості в межах загального методу розв'язувати поодинокі задачі, які можуть бути викликані практикою.

Глава 2 присвячена обґрунтуванню та формулюванню узагальненої задачі оптимального проектування сталевих стержневих конст-

рукції і розробці методу її розв'язання.

Виходячи з досвіду проектування сталених конструкцій, задача їх оптимізації подається в детермінованій постановці як багатопараметрична. Вектор змінних проектування містить як компоненти площі поперечних перерізів або їх лінійні розміри, координати стержневої системи, що визначають її геометричну схему, а також зусилля попереднього напруження, якщо вони передбачені для об'єкта, що проектується.

Узагальнена задача оптимального проектування формулюється так: при заданій топології стержневої системи умовах закріплення на опорах та зовнішніх навантаженнях визначити параметри геометричної схеми, розподіл внутрішніх зусиль та розміри поперечних перерізів елементів при умові досягнення мінімуму показником якості проекту /критерієм оптимальності/ та додержання заданих вимог, що подаються до конструкції.

Задачу названо узагальненою не тільки тому, що в ній окрім параметрів напружено-деформованого стану розглядається ще й параметри геометричної схеми /О.І.Виноградов назвав такі задачі узагальненими зворотними задачами теорії споруд/, але й тому, що в межах її розв'язання можуть бути реалізовані різні поодинокі випадки, що характерні для практики проектування. Серед них: - визначення оптимального розподілу внутрішніх зусиль і матеріалу в статично невизначній системі з фіксованою геометрією; - пошук оптимального рішення для конструкції з частково заданими параметрами /за технологічними, компоновочними або конструкційними міркуваннями можуть бути задані координати окремих вузлів і розміри поперечних перерізів окремих елементів/; - визначення оптимальних зусиль попереднього напруження в конструкції з повністю або частково заданими параметрами; - вибір найкращої із розглянутих конструктивних форм порівнянням їх оптимальних варіантів, здобутих при однакових вихідних даних на проектування; - пошук оптимальної кількості стержнів /топології/ конструкції; - оптимізація по заданих зусиллях поперечних перерізів елементів.

Розв'язання узагальненої задачі зпирається на класичні теоретичні передумови, що використовуються в багатьох задачах будівельної механіки, і можуть бути поширені на будь яку стержневу систему - плоску або просторову, поведінка якої під навантаженням відповідає умовам, що зазначені, а саме: - сталь працює в межах пружності; - система лінійно деформується; - стержні, що

з'єднують вузли системи, ідеально додержуються закону окреслення всієї конструкції і мають постійний по довжині поперечний переріз; - зовнішні вантажні дії квазістатичні; - умови міцності і стійкості регламентуються вимогами норм проектування сталених конструкцій; - в плоских конструкціях припускається наявність закріплення з плоскості в кожному вузлі.

Враховуючи нелінійний взаємозв'язок змінних проектування, що розшукуються /геометрія-зусилля-переріз/, узагальнена задача набуває нелінійну форму. Відомо, що в загальному випадку такі задачі є мультимодальними і відсутність доказу досягнення при їх розв'язанні глобального мінімуму призводить до умовно оптимального результату. Слід відзначити, що рішення всіх практичних задач також є умовно оптимальними і відрізняються від теоретично оптимальних внаслідок необхідності реалізації конструктивних та технологічних вимог /наприклад, різні показники мають конструкції з уніфікованими та неуніфікованими перерізами, запроєктовані під дію однієї або декілька навантажень тощо/. Тому в подальшому поняття "оптимальне рішення" трактується як рішення, що має перевагу перед аналогічним проектом, одержаним традиційно, для якого критерій оптимальності набуває мінімуму при обмеженнях, що відповідають умовам проектування, незалежно від того, якими міркуваннями вони диктуються. Вірогідність оптимального рішення задачі доводиться двома умовами: якщо результати, одержані різними методами, співпадуть; якщо однаковий результат одержано з різних стартових точок.

Математична модель узагальненої задачі, що відображає поведінку конструкції під навантаженням, складається з обмежень, які передають:

- умови міцності при розтягу, згині в одній або в двох плоскостях, позацентровому стиску /всі позначення відповідають прийнятим в БНП П-23-81^а/.

$$R_y \rho_c A_i / N_{ij} - 1,0 \geq 0, \quad 11/$$

$$R_y \rho_c W_i / M_{ij} - 1,0 \geq 0, \quad 12/$$

$$0,58 R_y \rho_c J_i t w_i / \theta_{ij} - 1,0 \geq 0, \quad 13/$$

$$R_y \rho_c / (M_{xi} / W_{xi} + M_{yi} / W_{yi}) - 1,0 \geq 0. \quad 14/$$

$$1,0 - (N_{ij} / A_i R_y \rho_c)^2 - M_{xi} / c_{xi} W_{xi} R_y \rho_c - M_{yi} / c_{yi} W_{yi} R_y \rho_c \geq 0. \quad 15/$$

$$R_y \rho_c / (N_{ij}/A_i + M_{xi}/W_{xi} + M_{yi}/W_{yi}) - 1,0 \geq 0 \quad /6/$$

- умови стійкості при згині, центральному та позацентровому стику в площині та із площині дії моменту

$$R_y \rho_c \psi_i W_i / M_{ij} - 1,0 \geq 0; \quad /7/$$

$$R_y \rho_c \psi_i A_i / N_{ij} - 1,0 \geq 0; \quad /8/$$

$$R_y \rho_c \psi_{ei} A_i / N_{ij} - 1,0 \geq 0; \quad /9/$$

$$R_y \rho_c c_i \psi_{yi} A_i / N_{ij} - 1,0 \geq 0; \quad /10/$$

$$R_y \rho_c \psi_{exyi} A_i / N_{ij} - 1,0 \geq 0; \quad /11/$$

- обмеження на граничну гнучкість елементів та переміщення вузлів системи

$$\lambda_{max} / \lambda_i - 1,0 \geq 0; \quad /12/$$

$$\Delta_{max} / \Delta_{ijk} - 1,0 \geq 0; \quad /13/$$

- обмеження на межі варіювання змінних параметрів

$$\min x_i \leq x_i \leq \max x_i \quad /14/$$

- конструктивні обмеження

$$g(x) \geq 0. \quad /15/$$

Тут: i -номер стержня /вузла/; $x = \{A | x | y | z | x_{пн}\}$ - вектор змінних проектування, що складається з площ поперечних перерізів A_i , координат вузлів x , y та z , зусиль поперечного напруження $x_{пн}$; N_{ij} ; M_{ij} ; Q_{ij} - зусилля в i -му елементі від j -го навантаження; Δ_{ijk} - переміщення i -го вузла при j -му навантаженні в напрямку k -тої координати.

Обмеження типу /15/ формуються під час проектування конкретної конструкції відбивають її специфічні особливості. До них можна віднести вимоги, що висловлюють умови компоновки поперечних перерізів, закони змінення координат вузлів конструкції /прямолинійний або криволінійний/, залежності, що відбивають зміни зовнішніх навантажень при варіюванні параметрами системи; законності розподілу зусиль або напружень по довжині елементів та ін. Уніфікація перерізів виконується привласненням єдиного номера

змінній A_i групі стержнів, які повинні мати однаковий переріз.

Детермінована цільова функція подана у вигляді зведення затрат. Для конструкції покриття вони записані так:

$$P = \sum C_i \sum \psi_i \sum \rho A_i l_i + k_1 (\sum \rho A_i l_i)^m + k_2 (H + k_3 L \operatorname{tg} \alpha) + B, \quad /I6/$$

де перший складник характеризує вартість матеріалу конструкції з врахуванням вартісних C_i та конструктивних ψ_i коефіцієнтів та питомої ваги сталі ρ , другий - трудомісткість виготовлення /ступеневу залежність прийнято за рекомендаціями проф. Я.М.Ліхтарникова/, третій - експлуатаційні витрати на об'єм, обмежений прольотом конструкції L , її висотою H з урахуванням кута нахилу верхнього поясу до горизонту α , четвертий - сталій складник. Значення коефіцієнтів m , k_1 , k_2 та k_3 приймаються в залежності від конструктивної форми споруди. При необхідності можливий перехід і до більш простих критеріїв /об'єму, маси, вартості матеріалу/ шляхом перетворення в нуль відповідних складників виразу /I6/.

Математична модель /I/-/I6/ повністю відповідає вимогам норм проектування і позбавлена будь-яких спрощень, що вигідно відрізняє її від інших аналогічних форм, в яких модель задачі пристосовується до вибраного методу розв'язку. Новина моделі полягає в її універсальності, що дозволяє використовувати її при проектуванні будь-якої системи /плоскої чи просторової/ з найбільш повним врахуванням необхідних умов роботи конструкції та її елементів.

Алгоритм рішення загальної задачі оптимального проектування будується на використанні апробованих методів - кінцевих елементів /для статичного розрахунку/ та неортогонального проектування градієнтів цільової функції /для розв'язання задачі оптимізації/. Обчислення починається з деякого початкового проекту, в якому кожна змінна набуває певного значення, яке не суперечить її інженерному змісту.

Після встановлення необхідних інженерних характеристик перерізів елементів за початковими, а на подальших кроках - за поточними значеннями A_i , виконується статичний розрахунок конструкції і за результатами аналізу її напружено-деформованого стану формується система обмежень.

Рішення задачі оптимізації спрямовано на кожному кроці на пошук нових значень змінних, що забезпечують змінення проекту в

сторону зменшення цільової функції. Відмінними особливостями прийнятого методу оптимізації є: використання стратегії активних обмежень, яка скорочує кількість обчислювальних операцій за рахунок обчислення на кожному кроці градієнтів /похідних по змінним/ не всіх, а лише порушених /активних/ обмежень; неортогональність проектування градієнту цільової функції на лінеарізовані обмеження, дотичні до допустимої області; процедури компенсації нев'язки, яка викликана лінеаризацією, що дозволяє відновлювати порушені обмежувальні умови на кожному кроці обчислювального процесу та прискорює збіжність до точки локального мінімуму; простота формування обмежень активного набору, що виключає ефект "прилипання" градієнту до обмеження.

Алгоритм завершує роботу при виконанні одної з двох умов: цільова функція на двох суміжних ітераціях має практично однакове значення; проекція градієнту в досягнутій точці дорівнює нулю, що означає, що градієнт спрямован перпендикулярно до поверхні області допустимих рішень.

Включення зусиль попереднього напруження до вектора змінних потребує виконання статичного аналізу попередньонапружених конструкцій і аналізу чутливості змінних напруженого стану відносно початкових зусиль. Статичний розрахунок методом кінцевих елементів виконується для редуційованої системи, в якій зусилля попереднього напруження прикладаються у вигляді двох сил, спрямованих позаддовж вісі елемента, жорсткість якого зведена до зневажливо малого значення. В цьому ж елементі так само, як і в інших, визначаються зусилля самонатягу від усіх заданих навантажень. Таким чином в кожному елементі конструкції виникають повні зусилля, які складаються із суми зусиль самонатягу і попереднього напруження.

Слід зауважити, що цільова функція незалежна від змінних зусиль попереднього напруження і ці зусилля наведені лише в обмеженнях. Таким чином градієнт цільової функції, знайдений під час її диференціювання за цими зусиллями, дорівнює нулю та при відсутності активних обмежень прирошення зусиль попереднього напруження також є нульовими. Однак при появі хоч би одного активного обмеження, яке залежить від попереднього напруження, прирошення змінних відрізняються від нуля, що впливає й на проекцію антиградієнту.

Високу ефективність розробленому алгоритму надає масштабування змінних, тобто зведення кожної компоненти вектора невідомих

параметрів до єдиного порядку числа, та використання аналізу чутливості активних обмежень, спрямованого на виявлення впливу збуджень змінних на оптимальний проект. Відсутність обмежень на кількість змінних та вимог, що враховуються, спроможність розв'язання широкого кола практичних задач підкреслює можливість застосування алгоритму до розрахунку довільної конструкції, яка може апроксимуватися кінцево-елементною моделлю.

В главі 3 розглядається організація пакета прикладних програм /ППП/ "Пошук", якого призначено для розв'язання на ПЕОМ, сумісних з IBM-PC/XT/AT, задач оптимального проектування плоских /"Пошук-1"/ та просторових /"Пошук-2"/ стержневих конструкцій. Обидві версії, створення яких обумовлено технічними можливостями ПЕОМ, мають ідентичну структуру та їх основна відмінність полягає в використанні різних кінцево-елементних програм для статичного розрахунку конструкцій. Модульність ППП забезпечує застосування взаємозамінних блоків в обох версіях, а також заміну та доповнення їх складових іншими еквівалентними програмами. Тому розроблені ППП можуть бути використані як для розв'язання прикладних задач, так і для відроблення нових процедур оптимізації і нових постановок таких задач.

Програмний комплекс "Пошук-1" /рис.1/ складається з блоків підготовки даних в інтерактивному режимі *WELCOME*, статичного аналізу конструкції, її оптимізації і процесорних блоків, що здійснюють їх взаємодію. Відбуття результатів розрахунку і оптимізації здійснюється в графічному вигляді на екрані дисплея ПЕОМ блоком *PLOT*. До числа вхідних параметрів відносяться відомості про топологію та матеріал конструкції, схеми прикладення та величини зовнішніх навантажень, прийнятий критерій оптимальності та обмеження, що враховуються, типи поперечних перерізів елементів та їх вузлові сполучення.

В блоці аналізу статичний розрахунок, який виконується в підблоках *MATRS* або *MATRSP* /при наявності попереднього напруження/, випереджує визначення геометричних характеристик поперечних перерізів елементів. Враховуючи безперервність варіювання змінних в процесі оптимізації, що відносяться і до шуканих площ S_i , на кожному кроці ітераційного розрахунку аналогічно повинні змінюватися геометричні характеристики. Необхідні залежності для різноманітних сортаментних профілів встановлені з використанням безрозмірних параметрів: зведеного радіуса інерції перерізу $R_{x,y}$ і

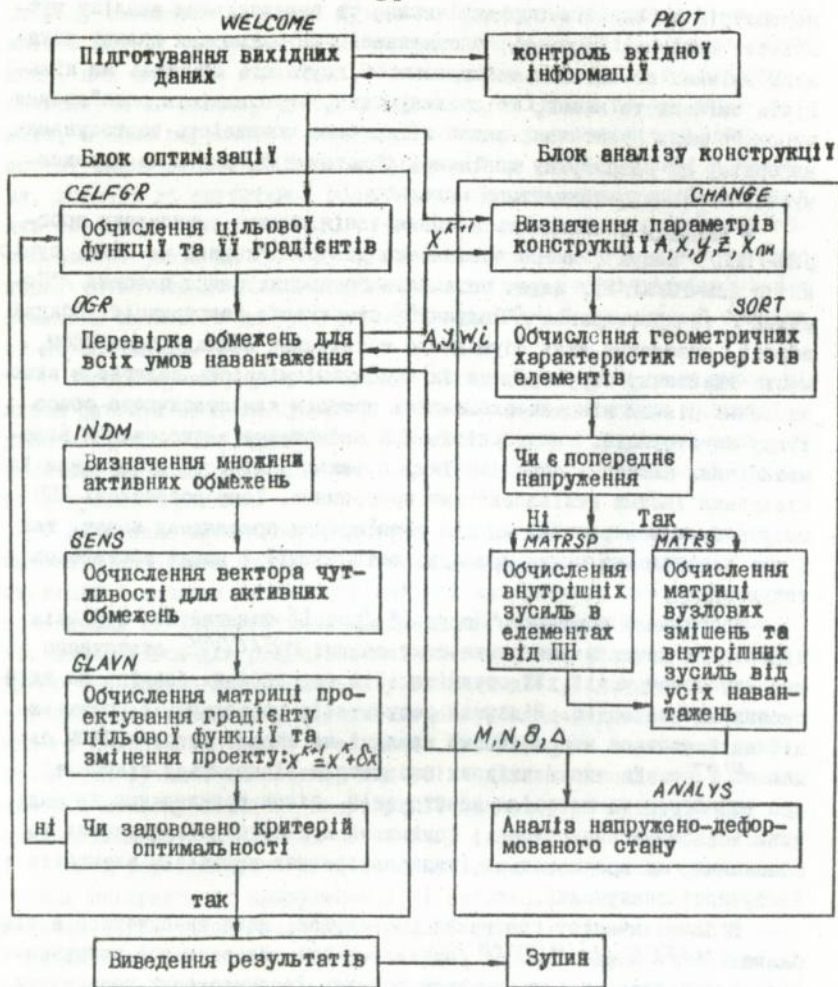


Рис. 1. Блок-схема ППЧ "Пошук"

коефіцієнта ефективності перерізу $\bar{C}_{x,y}$:

$$i = \rho \sqrt{A} ; \quad h = i / \sqrt{\bar{c}} ;$$

$$y = \rho^2 A^2 ; \quad W = 2A^{3/2} \rho \sqrt{\bar{c}} ,$$

/17/

де $\rho_{x,y} = i_{x,y} / \sqrt{A}$; $\bar{c}_x = i_x^2 / h^2$; $c_y = i_y^2 / b^2$ - безрозмірні параметри, знайдені для визначеного сортаментного ряду; i_x, y, h, b - відповідно радіус інерції, висота та шарана перерізу, прийняті за сортаментом.

Відмічено, що аналогічний підхід може бути застосовано також для стержнів складеного перерізу, для яких необхідні параметри профілей можуть бути визначені шляхом обробки даних для ряду оптимально скомпонованих перерізів. Можливий інший підхід, запропонований в главі 5.

Розрахунок конструкцій з фіксованою на кожному кроці геометричною схемою виконується на завантаження, сполучення зовнішніх навантажень для яких передбачено у вихідній інформації. Найбільш несприятлива комбінація зусиль відповідає тому з q обмежень, сформованих за результатами розрахунку конструкції на кожне з j сполучень навантажень, яке стає активним в процесі оптимізації: такий підхід суттєво економить об'єм оперативної пам'яті ПЕОМ і практично не відбивається на часі розв'язання задачі оптимізації, бо при цьому аналізується не всі, а тільки порушені обмеження. Автоматизоване формування системи обмежень виконується за результатами аналізу напруженого стану кожного елемента /підблок ANALYS/.

Блок оптимізації призначено для обчислення нового вектора змінних проектування на основі значень цільової функції, обмежень і їх градієнтів. Формування цільової функції у вигляді маси конструкції в програмі CELFR виконується автоматично на основі інформації, яка вводиться про координати вузлів системи, кількість стержнів та площі їх поперечних перерізів. Цільові функції у вигляді вартості і зведених витрат формуються за допомогою виразу /16/ виходчи з маси конструкції і введених значень вагових і вартісних коефіцієнтів. Обчислення градієнтів цільової функції передбачено у двох режимах: на основі аналітичних виразів та з використанням скінчено-різницевої апроксимації.

Підблок OBR оформлено у вигляді програми-функції, яка за номером обмеження відновлює його значення. Вирази в програмі OBR відповідають математичній моделі /1/ - /15/ і вибір потрібного

обмеження здійснюється з використанням вхідної інформації про типи обмежень та інформації про напружений стан, що поступає з блоку аналізу.

Програмою *INDM* кожному обмеженню привласнюється порядковий номер та формується допоміжний список активних обмежень, який вміщує послідовність їх порядкових номерів. Такий прийом передбачає переупорядкування масивів обмежень та рядків матриць без фізичного переміщення останніх, проводячи необхідні перестановки лише на індексному рівні. На цій підставі в підблоку *SENS* обчислюються коефіцієнти чутливості активних обмежень і формується матриця чутливості активних обмежень і формується матриця чутливості.

Далі в підблоку *GLAVN* формується матриця, що проєктується, внаслідок чого обчислюється новий напрямок спуску і значення змінних, що покращують проєкт в допустимій області.

Організація взаємодії блоків аналізу та оптимізації здійснюється за допомогою процесорного блока *CHANGE*, метою якого є переведення змінних проєктування в систему вхідних параметрів, що записані у формі, яка потрібна для блока аналізу.

Перетворення всередині процесора не обмежуються формальними зміненнями, а вміщують такі обчислювальні процедури, як масштабування змінних, їх об'єднання в групи внаслідок уніфікації, врахування вимог симетрії та інші прийоми, що забезпечують адекватний опис конструкції.

Вірогідність роботи алгоритму та пакета прикладних програм проаналізована при розв'язанні тестових задач, які досить широко використовуються для цієї мети. Результати отримані іншими авторами різними методами оптимізації, практично співпадають з даними розрахунків, що виконані з допомогою ШШ "Пошук". На прикладі попередньо напруженої шпрингельної балки продемонстровано досягнення одного і того ж оптимального проєкту з різних стартових точок.

В главі 4 вивчені особливості формування оптимальних геометричних схем наскрізних конструкцій та питання пошуку оптимальної топології системи.

На прикладах проєктування ферм покриття /з паралельними поясами, двосхила малоелементна, типу "арка із затяжкою"/ досліджено вплив вихідних даних, що визначають призначення об'єктів, матеріал і типи перерізів елементів, критерій оптимальності та рівень врахування конструктивних вимог, на їх оптимальні геомет-

ричні схеми.

Аналіз отриманих результатів виявив суттєву залежність не тільки металосмкості, але й геометричних параметрів від розглянутих факторів. Так, застосування різних профілей в елементах ферм /спарованих кутників, широкополочних таврів, труб/ призводить до зміни оптимальної висоти конструкції в достатньо широких межах /20-30%. Суттєво впливає і уніфікація перерізів, бо скорочення числа типорозмірів збільшує висоту до 15%. Аналогічно змінюються параметри геометричних схем ферм, для яких внаслідок відмінності значень граничних прогинів, в процесі оптимізації активними ставали різні обмеження. В той же час збільшення розрахункового опору сталі поясів, хоч і суттєво знижує металосмкість, практично не впливає на оптимальну геометрію - оптимальна висота зменшується до 5%.

Слід відзначити, що на оптимальну геометричну схему конструкції впливає і попереднє призначення того чи іншого параметра за будь-якими міркуваннями /один з окремих випадків узагальненої задачі оптимального проектування/.

Результати виконаного аналізу свідчать про те, що загальні рекомендації по призначенню співвідношень генеральних розмірів, розроблені для багатьох конструкцій, можуть бути суттєво скоректовані при врахуванні всіх факторів, що на них впливають, тому оптимальні геометричні параметри слід відшукувати після конкретизації технічного завдання на проектування і визначення мети оптимізації. При цьому можливе завдання по різним міркуванням тих чи інших параметрів, а також пошук нової топології системи в інтерактивному режимі: із системи, що має довільне, в тому числі і "надмірне" число стержнів, послідовно виключаються елементи, поперечний переріз яких наближається до нуля /ознакою "виродження" стержня може бути активність обмежень на його граничну гнучкість/ або вісі яких "зливаються", тобто наближаються між собою на відстань, меншу за габарити поперечних перерізів стержнів. Якщо вузли в процесі розв'язання зближуються між собою на відстань, меншу за габарити деталей їх конструктивного оформлення, один з них також може бути вилучен з системи, що аналізується.

Після коректировки геометричної схеми процес її оптимізації повторюється до появи нових топологічних змін. При цьому контролюються значення цільової функції, які не повинні збільшуватись під час перетворення системи /рис. 2/.

При пошуку оптимальної топології конструкцій виявлено ряд

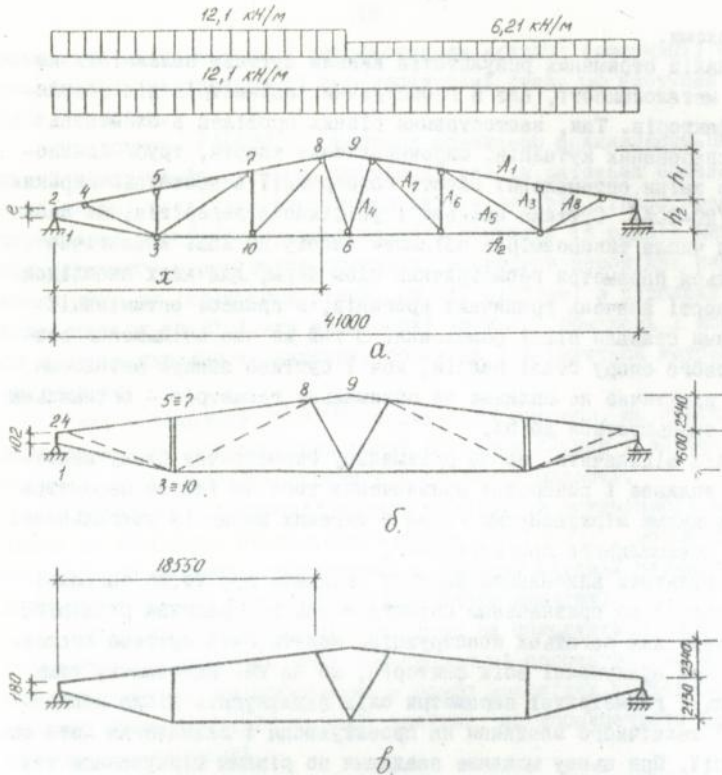


Рис. 2. Схеми малоелементної ферми
 а – базова; б – оптимальна; в – прийнята

особливостей, що відбиваються на кінцевому результаті. До них відноситься необхідність корективки розрахункової схеми конструкції, в тому числі схем і значень вузлових навантажень. В той же час для систем, що навантажені розподіленими навантаженнями, їх значення зберігають сталість при топологічних перетвореннях. Слід також відзначити, що запропонована стратегія пошуку оптимальної топології конструкцій дозволяє проаналізувати ефективність прийнятого проектного рішення і виявити тенденції вдосконалення тої чи іншої конструктивної форми.

Розроблений метод, алгоритм і пакет прикладних програм використані для дослідження, аналізу і розробки рекомендацій по вдосконаленню конструкцій індивідуального призначення – комбіно-

ваних вантових систем /глава 5/ і просторових решітчастих опорних блоків морських стаціонарних платформ /глава 6/.

Для попередньо-напружених комбінованих вантових систем запропоновано також аналітичний метод визначення оптимальних параметрів, побудований на принципі декомпозиції задачі. На першому етапі визначення параметрів напруженого стану і розмірів панелей балки жорсткості ведеться за критеріями раціонального її проектування /балка є найбільш матеріаломістким елементом конструкції і може бути спроектована рівномоментною або рівнонапруженою/, а на другому – відшукується оптимальна висота ілонів за умовами мінімуму вартості матеріалу конструкції.

Призначений характер розподілення зусиль в балці забезпечується вибором вертикальних складових повних зусиль у вантах S_i /сума зусиль самонатягу, що виникають в ненапруженій статично невизначній системі, та зусиль попереднього напруження/ і відстанями між точками їх прикладання (a_{i-1}, a_i) . При цьому балка незалежно від типу її конструктивного рішення розглядається як суцільний стержень, завантажений еквівалентним рівномірно розподіленим навантаженням. В рівномоментній балці вирівнюються згинаючі моменти в прольотних та опорних /в місцях закріплення вантів/ перерізах. Отримана за цими умовами система квадратних рівнянь розв'язується в загальному вигляді, а єдиність її рішення забезпечується вибором корнів рівнянь, значення яких не порушує інженерного змісту задачі. За допомогою методу математичної індукції, який дозволяє перейти від окремих тверджень до загальних, шукані параметри представлено в залежності від числа вант n :

$$S_i = q l \sqrt{2} / (1 + n \sqrt{2}); a_i = l [1 + (2i - 1) \sqrt{2}] / [2(1 + n \sqrt{2})] / 18$$

де a_i – відстань від лівої опори до вузла закріплення i -тої ванти.

Для одержання рівнонапруженого рішення розподілення зусиль відповідає принципу: максимальній поздовжній силі відповідає мінімальний за абсолютною величиною згинаючий момент і навпаки. Враховуючи залежність розподілення поздовжніх сил в балці від схеми розміщення вантів задача вирішена для шести розглянутих комбінованих вантових систем /розпірних и безрозпірних/. Система квадратних рівнянь, що висловлює рівність площ поперечних перерізів в прольоті і на опорі, має єдине розв'язання, що дозволяє подати його в загальному вигляді для кожною схеми конструкції.

Знайдені на першому етапі параметри визначають повні зусилля в усіх елементах конструкції, виходячи з яких формується вираз маси або вартості матеріалів системи. Диференціюванням отриманих виразів /для шести схем/ за змінними висотами пілонів та закладанням відтяжок /для розпірних систем/ отримані вирази, що залежать від кількості вантів, для визначення оптимальних значень шуканих величин.

Враховуючи високу чутливість цільової функції, яка висловлює прийнятий критерій оптимальності комбінованої системи, до варіантів змінних, в ППП "Пошук" зроблені доповнення, що відображають ці особливості конструкції. Пошук оптимального проєкту забезпечується вибором початкового наближення, для чого використовується аналітичне рішення, та накладанням додаткових обмежень, які описують умови компоновання складених перерізів жорстких елементів і розподілення згинаючих моментів в балці жорсткості

$$|M_{прі}| - |M_{опі}| \geq 0, \quad /19/$$

де $|M_{прі}|$, $|M_{опі}|$ - абсолютні значення згинаючих моментів відповідно в середині панелі балки жорсткості і в місцях закріплення вантів.

Для складених дватаврових перерізів розроблено нові безітераційні алгоритми, які дозволяють скомпонувати їх оптимальний варіант за поточним значенням площі A_i , а потім знайти необхідні геометричні характеристики. При цьому реалізовані відомі ознаки оптимальності перерізів: максимальна тонкощинність полук і стінки за умовами забезпечення їх місцевої стійкості, рівностійкість і технологічність /ширина полук стиснених елементів не перевищує висоти стінки/.

Оптимальний переріз елемента, що згинається, формується при максимальній гнучкості стійкої стінки. Розміри, а також і геометричні характеристики центрально-стиснутого елемента висловлені через оптимальну гнучкість стержня, яка знайдена за умовами його рівностійкості, і відношення площі полки до загальної площі, що визначається з урахуванням співвідношення розрахункових довжин. Для позацентрово-стиснутого стержня оптимальна гнучкість в площині дії моменту відшукується як для еквівалентного центрально-стиснутого стержня, завдяки чому шукані характеристики перерізу подаються в залежності від максимальної гнучкості стінки і співвідношення площі стінки до площі всього перерізу, вирази для визначення яких отримані методом множинної покрокової регресії

із аналізу параметрів оптимальних перерізів, що скомпоновані за різними вихідними даними.

Порівняння результатів аналітичного і чисельного рішення задачі визначення геометричних параметрів комбінованих вантових систем показують їх практичний збіг при дії рівномірно розподіленого навантаження, яке прикладено до балки жорсткості, що дає основу стверджувати, що вибрана стратегія оптимізації дозволяє в випадку, який розглядається, наблизитися до глобального мінімуму цільової функції.

Встановлено, що найбільш раціональними конструкції з рівномоментними балками жорсткості, перерізи яких змінюються в кожній панелі. Рівнонапружені балки постійного по всьому прольоту перерізу завжди на 3-7% дорожчі ніж рівномоментні. Значення відносних висот пілонів виявляються досить великими для однопілонних систем /0,3-0,4 прольоту/ і зникають для двохпілонних /0,2 прольоту/.

Оптимальне закладання відтяжки в розпірних системах завжди більше одиниці /рівність одиниці відповідає мінімуму витрат на ванті, а не на всю систему/, однак відступ від нього незначно позначається як на висоті пілонів, так і на вартості усієї системи.

Вибір топології комбінованих вантових систем виконано о-ривнянням оптимальних значень їх вартостей, знайдених при різній кількості вантів. Встановлено, що для розпірних систем мінімум вартості матеріалів досягається при 13-20 вантах внаслідок різкого /до 85-90%/ зниження витрат сталі на балку жорсткості за рахунок зменшення в неї згинних зусиль. В той же час вже при невеликій кількості вантів вартість має достатньо стабільні значення, які відрізняються від оптимальних до 5%. Виходячи з цього, число вант, що рекомендується для розпірних систем становить 4-6, а безрозпірних - 3-6. Застосування менше двох вантів недоцільно, тому що в такому випадку маса балки жорсткості істотно зростає і становить більше як 50% маси всієї конструкції.

Ще одну групу досліджених конструкцій складають морські стаціонарні платформи /МСП/, що призначені для розвідки та видобутку вуглеводневої сировини на континентал'ному шельфі морів. Незважаючи на існуючі загальні принципи конструювання МСП, вони є об'єктами індивідуального проектування, на які суттєво впливають регіональні умови будівництва. В цьому зв'язку виконані дослідження обмежені умовами Азово-Чорноморського регіону, ресурси якого оцінюються в 2,4 трлн.м³ газу, серед яких 1,4 трлн.м³ припадає

на північно-західну частину Чорного моря. Регіон, що розглядається, характеризується наявністю акваторій, що замерзають, має відповідну виробничу базу для виготовлення та монтажу конструкцій в морі. Орієнтація на транспортні та вантажодійомні плавучі засоби, які є, диктує спосіб монтажу конструкцій /малими блоками/, що відображається і на конструктивних рішеннях опорних частин МСП, які на глибинах до 30 м, що вже освоєні, прийняті поліблочними, за винятком льодостійких платформ, для яких опорна частина з метою зниження льодового навантаження виконується в вигляді одного блока.

Розширення районів видобутку та перехід на більші глибини /більш за 60% запасів газу, що розвідані, знаходяться на глибинах 50-100 м/ потребує розробки нових конструктивних рішень, пошук яких здійснен з позицій оптимального проектування. Для відображення специфіки МСП виконані додаткові дослідження, результати яких мають ще й самостійне значення.

На базі аналізу робочих креслень 7 проектів, що були розроблені в 1974-1980 рр. для МСП, які являють собою основні типи конструктивних рішень регіона, встановлені конструктивні коефіцієнти основних елементів опорних блоків, що використані далі для визначення фактичних мас конструкцій. Відзначено, що значення коефіцієнтів перевитрат матеріалу ψ_n при підборі перерізів коливається в значних межах /наприклад, для опорних стовпів максимальне значення ψ_n складає 9,5/ і мають загальну тенденцію до зменшення з зростанням глибини моря. Враховуючи необхідність збереження уніфікації перерізів при оптимальному проектуванні опорних блоків, перевитрати матеріалу у найбільш навантаженому елементі зберігалися на рівні, що визначен середніми мінімальними значеннями ψ_n , які складають для стовпів - 2,08, горизонтальних в'язів - 1,73, розкосів - 1,42. Для льодостійких платформ ті ж коефіцієнти становлять відповідно 1,61, 1,33 і 1,18. Будівальний коефіцієнт, що відображає масу допоміжних деталей для опорних частин МСП, становить 1,15-1,3.

Для 16 збудованих МСП вивчено витрати, склад технологічних операцій на виготовлення та монтаж конструкцій, а також трудомісткість основних робіт. На базі одержаних даних встановлено вирази цільових функцій, що відображають фактичні витрати матеріалів, трудомісткість та вартість виготовлення та монтажу з урахуванням технічних можливостей, що характерні для берегового полігона ВО Чорноморнафтогаз та Чорномортехфлоту. Вартість виго-

товлення враховує специфіку організації робіт, пов'язану з долу-ченням для збирання та зварки конструкцій не тільки берегових, але й плавучих кранів. При оцінці витрат на роботи в морі враховані кошти, що витрачаються на оренду різних комплектів суден, які використовуються для цієї мети. Аналіз одержаних виразів підтвердив їх вірогідність шляхом порівняння з фактичними даними - розкид теоретичних та фактичних значень трудомісткості та вартості виготовлення не перевищує 10%, а для аналогічних показників по монтажу - 15%.

Значення хвильових навантажень на преопу, що обтікається, залежать від розмірів останньої. Враховуючи необхідність коригування горизонтальних впливів при варіюванні розмірами поперечних перерізів елементів, розроблена інженерна методика визначення навантажень від хвиль та течій в залежності від діаметра трубчастих стержнів. Для параметрів хвиль північно-західної частини Чорного моря розглянуто діапазон глибин від 30 до 100 м та одержані значення хвильових навантажень при одиничному діаметрі вертикальних стояків.

Навантаження, що підраховані для різних глибин моря, склали ряд спостережень, аналіз яких методом множинної покрокової регресії дозволив визначити вирази для складових хвильового навантаження в залежності від діаметрів стержнів. Порівняння навантажень, визначених по методиці, що пропонується, з нормативними значеннями демонструє їх розбіжність до 11%.

Основними елементами опорних блоків є вертикальні стояки, що виготовляються трубчастими або комплексними. Останні складаються з двох чи більше сталевих труб, що розташовані концентрично, заповнені між якими бетоном. Такі перерізи використані в льодостійких платформах з метою локального підкріплення сталевих стояків на участках, де діють значні поперечні сили. При визначенні несучої здатності комплексного елемента наявність бетону в перерізі не враховувалась.

Дослідженню міцності трубобетонних елементів та сумісної роботи обійми і заповнювача присвячені роботи О.А.Довженко, О.І.Кікіна, Л.К.Лукші, В.О.Росновського, Р.С.Санжаровського, Л.І.Стороженка, В.А.Труля та інших вчених, але використання розроблених ними методів для розрахунку сталевобетонних стержнів кільцевого перерізу утруднено внаслідок відсутності в них урахування сумісної роботи заповнювача з внутрішньою обіймою. Для цього можна скористатися чисельними методами теорії багат шарових пластин та

оболонки, розробці яких присвячені праці А.Т.Василенко, В.В.Власова, Я.М.Григоренко, О.О.Расказова, В.Г.Піскунова, О.С.Сахарова, В.К.Чибірякова та багатьох інших, але з практичної точки зору для конструктора необхідна методика, яка дозволяє в межах оптимального проектування конструкції підбирати переріз елемента. Для II розробки проведені теоретичні та експериментальні дослідження роботи сталевобетонних стержнів кільцевого перерізу при центральному та позакцентровому стиску.

Для вивчення механізму роботи комплексного перерізу випробувано 10 серій зразків /по 3 в кожній серії/, що відрізнялися способом передачі осевого навантаження, міцністю заповнювача, діаметром внутрішньої труби та довжиною. Вперше експериментально виявлено особливості напружено-деформованого стану на різних стадіях роботи зразків. При передачі осевого навантаження на весь переріз його робота на I стадії визначена силами зчеплення між бетоном і сталлю. Однак ці сили малі /не перевищують міцності бетону на розтяг/ і під дією сили стиску, що постійно росте, зовнішня оболонка відшаровується від бетону внаслідок різниці між коефіцієнтами поперечної деформації сталі та заповнювача і працює на одноосовий стиск /II стадія/. Коли напруження в бетоні досягають рівня $0,5 R_b^2 / R_b^0$ - призмента міцність бетону/, в ньому починається процес мікротріщиноутворення, що дозволяє йому знову вступити в контакт з зовнішньою оболонкою /III стадія/, що зберігається аж до вичерпання несучої здатності зразка при сумісній роботі усіх компонентів.

При передачі навантаження тільки на труби після подолання сил зчеплення між сталлю та бетоном зовнішня труба працює на одноосовий стиск /I та II стадії/ і несуча здатність зразка визначається міцністю зовнішньої та внутрішньої оболонок. Внаслідок цього несуча здатність таких зразків, а також і контрольних, що були виконані тільки з труб /без заповнювача/, практично збіглася. Передача навантаження тільки на бетон забезпечує сумісну роботу компонентів перерізу від початку випробувань аж до втрати несучої здатності /III стадія/, яка чиниться на рівні показників зразків першого типу, але супроводиться розвитком деформацій на 30-40% більших.

В результаті досліджень, що виконані, встановлено раціональність передачі навантаження на весь переріз або тільки на бетон, тому що в цих випадках несуча здатність на 48 та 45% вище ніж при передачі II тільки на труби, як це передбачено в за-

проектованих та зведених опорних частинах МСП.

Виходячи з аналізу експериментальних даних встановлено, що підвищення несучої здатності та зниження деформативності зв'язані з збільшенням міцності бетону. Однак ефективність його використання /відношення фактичних напружень в бетоні до його призматичної міцності/ при цьому зникає. Для раціональної роботи бетону необхідно, щоб жорсткість заповнювача не перебільшувала половини жорсткості металевих труб.

З ростом довжини стержнів їх несуча здатність зникає, що пояснюється впливом поздовжнього згину, яке проявляється при відношенні довжини до діаметра стержня більш 4. Врахування цього явища можливе при використанні коефіцієнта поздовжнього згину, знайденого по формулі Л.І.Стороженка, яка була одержана для трубобетонних елементів.

Слід відзначити, що нерівномірність напружено-деформованого стану зовнішньої та внутрішньої оболонок /внутрішня труба завжди знаходиться в умовах всебічного стиску/ пов'язана з нелінійністю деформування бетону та змінністю нормальних напружень по перерізу бетонного шару, що визначає різницю модулів деформацій в точках з різними напруженнями. Ця залежність описується за допомогою інтегрального модуля деформацій та по результатам експериментів на базі регресійного аналізу була уточнена в даній роботі для точок контакту з внутрішньою та зовнішньою оболонками.

За розрахунковий граничний стан елементів, стиснутих центрально, прийнято досягнення зведеними напруженнями, що виникають у зовнішній об'ємі, границі текучості. Компонування перерізу ведеться в припущенні рівності деформацій заповнювача та оболонок по межах контакту при умові, що в граничному стані бетон працює на всебічний стиск від навантаження та реактивного впливу об'єми. Мінімізація маси або вартості елемента виконується з врахуванням забезпечення міцності та стійкості стержня при обмеженнях на напруження в бетонному кільці та внутрішній об'ємі, на ефективність використання бетону при змінному модулі деформації матеріалу та на мінімальну товщину бетонного шару, що визначається технологічними вимогами.

Випробування стиснуто-зігнутих стержнів проводилися при постійном осьовом навантаженні та змінній поперечній силі, що постійно зростала до вичерпання несучої здатності. Виявлено, що такі стержні перестають задовольняти умовам міцності набагато раніше втрати стійкості. За граничний стан прийнято досягнення

поздовжними стискаючими напруженнями в зовнішній обоймі границі текучості, а напруженнями в стиснутій зоні бетону – призмної міцності. При цьому припускається додержання гіпотези плоских перерізів та умов рівноваги для перерізу, що розглядається, при відсутності роботи бетону в розтягнутій зоні і відповідності епюр напружень в бетоні та сталі прямолінійному обрису.

З диференційного рівняння другого порядку пружної лінії в середньому перерізі стержня при поздовжньо-поперечному згині отримано загальне розв'язання для визначення прогину елемента, а потім і лінійне рівняння згинаючого моменту в тій же перерізі. Інтегруючи умови рівноваги з врахуванням плоского розподілу деформацій по поперечному перерізу одержані вирази для визначення в граничному стані N і M для двох основних випадків, пов'язаних з розташуванням стиснутої зони в межах і по за межами внутрішньої труби, що регулюється значеннями центрального кута, який обмежує стиснуту зону по радіусу зовнішньої обойми. Значення цього кута одержані по результатам числових досліджень методом множинної покрокової регресії. Задача підбору перерізу стиснуто-згнутого стержня вирішена при тих же обмеженнях, що прийняті і для центрально-стиснутого елемента, при умові перевищення граничних значень нормальної сили та згинаючого моменту фактичних величин.

Дослідження, що проведені, спрямовані на врахування специфічних особливостей проектування опорних частин МСП. Їх результати дозволили доповнити ППП "Пошук" програмними блоками, що призначені: для визначення навантажень від хвиль та течій на конструкції в залежності від текучих значень діаметра елементів /як змінні проектування при розв'язанні задач оптимізації опорних блоків МСП крім координат вузлів прийняти не площі перерізів, а діаметри трубчастих елементів/ з зведенням їх лінійних значень до вузлових; для обчислення цільової функції /маси або вартості конструкції, що виготовлена чи змонтована/; для підбору кільцевих перерізів сталевобетонних стержнів. Для різних типів платформ виконані числові дослідження, спрямовані на вияв раціональних конструктивних рішень опорних блоків, вибір типу решітки та пошук оптимального кута нахилу стоек. На базі порівняння оптимальних рішень та аналізу одержаних геометричних схем встановлені основні напрямки вдосконалення конструктивних форм опорних блоків, що забезпечує зниження їх матеріалоемкості: перехід від найбільш розповсюджених поліблочних до моноблочних

рішень; зменшення кількості опорних стояків з розміщенням елементів, необхідних для кріплення розрахункового числа паль, в придонній частині; використання призматичних опорних блоків, найбільш зручних в технологічному відношенні, на глибинах до 50 м, а пірамідальних – на більших глибинах; скоротчення поперечних розмірів опорних блоків біля ватерлінії з метою зменшення хвильового навантаження на споруду; застосування напіврозкритої решітки в наскрізних конструкціях, використовуючи хрестову решітку при необхідності забезпечення підвищеної жорсткості конструкції або з метою зменшення поперечного розміру платформи у морського дна.

В главі 7 даються відомості про використання результатів дисертаційної роботи та їх техніко-економічну ефективність. Наведені приклади оптимального проектування панельно-шпренгельної системи, застосованої в покритті будівлі теплої стоянки будівельних машин в м.Сімферополі, попередньо-напруженого покриття цеху по переробці скрапа металургійного заводу, просторової конструкції покриття спортивної арени, комбінованої вантової системи для споруди, призначеної для перетворення об'єкту "Укриття" Чорнобильської АЕС в екологічно безпечну систему. Оптимальні рішення, що приводяться, дозволили суттєво /від 8 до 14%/ знизити матеріаломісткість конструкцій за рахунок вибору їх геометричних параметрів та зусиль попереднього напруження, що забезпечили оптимальний розподіл внутрішніх зусиль та матеріалу в системах, що розглянуті.

Рекомендації по формуванню конструктивних схем опорних блоків МСП, метод оптимального проектування та методика розрахунку сталевобетонних стержнів кільцевого перерізу знайшли застосування при проектуванні та реконструкції МСП "Голицино-4" кількох платформ для Чорного моря.

Для льодостійких платформ запропонована нова конструкція вузла опирання палубної будівлі на опорні стояки, що забезпечує передачу вертикального навантаження на усі компоненти комплексного перерізу. Доцільність розробленого рішення підтверджено результатами натурного випробування льодостійкої платформи "Стрелка-5" в Азовському морі. Деформації в зовнішніх трубах від горизонтального навантаження, що імітують тиск льодового поля, знайдені експериментально, дозволили порівняти фактичні напруження з теоретичними їх значеннями. Найбільш влучний збіг відмічено для випадку, коли розрахунковий переріз опорних стояків складають

тільки сталні труби /без врахування заповнювача/, що свідчить про те, що в реалізованому варіанті вузла опирання палуби /реакція палуби передається тільки на труби/ наявність бетонного заповнювача майже не впливає на несучу здатність стояків.

При передачі вертикального навантаження на весь переріз зниження витрат матеріалів на опорні стояки для МСП "Стрелка-5" та "Каркінітська-19" складає відповідно 31 і 18%, що свідчить про високу ефективність запропонованого рішення. При приблизній рівності несучих здатностей стояків, що порівнюються, діаметри зовнішніх труб в запропонованих варіантах суттєво зменшені /наприклад, для МСП "Стрелка-5" від 1420 до 1020 мм/, що в свою чергу знижує хвильове та льодове навантаження на опорулу.

Аналіз структури вартості МСП, що змонтовані в Азово-Чорноморському регіоні, показує, що монтажні роботи в морі складають майже 50% всіх витрат на будівництво. Така висока вартість монтажу пояснюється витратами на оренду флоту, за допомогою якого конструкції транспортуються та монтуються відносно малими блоками, а також великим терміном робіт. В зв'язку з цим ще один шлях /крім зниження матеріалоемкості/ вдосконалення конструктивних форм опорних блоків полягає в підвищенні рівня берегової готовності конструкцій, зниженні числа монтажних одиниць, обмеженні використання суден та плавучих кранів, що в результаті приводить до скорочення терміна будівництва.

Запропоновані нові технічні рішення опорних блоків МСП, які підтвержені п'ятьма авторськими свідоцтвами і відрізняються раціональністю форм, при розробці яких реалізовані такі принципи: виконання опорної частини в вигляді моноблока, що забезпечує концентрацію матеріалу в опорних колонах, що дозволяє збільшити їх діаметр, отже і створити певний запас власної плавучості; звуження конструкцій в рівні хвилювання моря з метою зменшення хвильових впливів; застосування наскрізних опор призматичної форми на великих глибинах, що підвищує технологічність їх виготовлення; розміщення в придонній частині коротких стояків, що дозволяє закріпити потрібну кількість пал' /рис. 3/.

Опорний блок, що трансформується, транспортується на місце влаштування з застосуванням власної плавучості та монтується баластировкою внутрішніх заповнених трубчастих стояків. Проведені експериментальні дослідження моделі такого блоку масштабом 1:31,555 з забезпеченням геометричної та вагової подібності. Випробування проводились в басейні інституту гідромеханіки АН

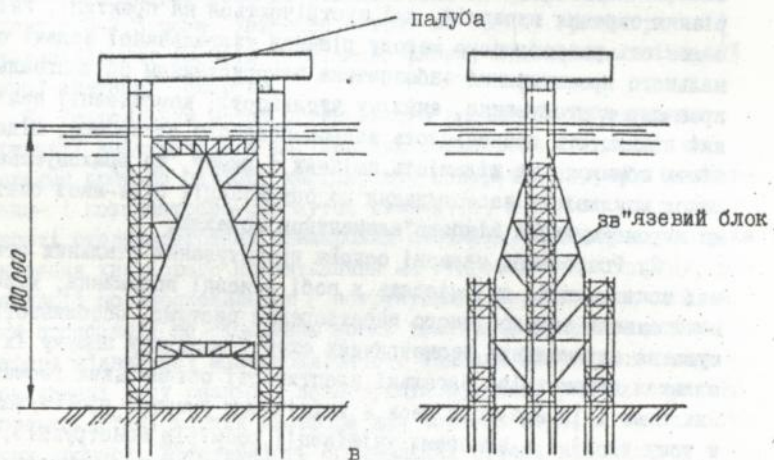
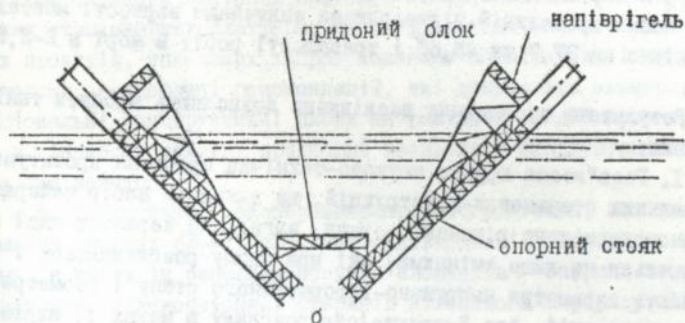
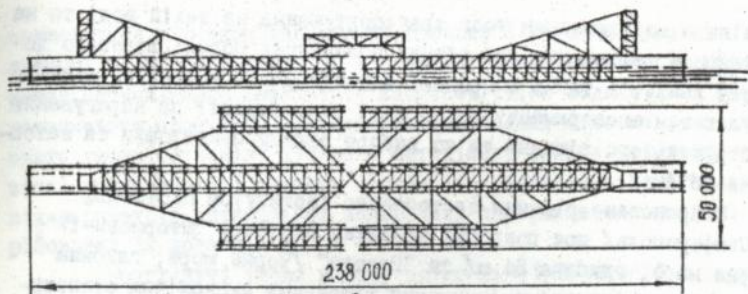


Рис. 3. Баластована платформа "Базова"
 а - в транспортному положенні; б - в процесі занурення;
 в - в проектному положенні.

України з моделюванням умов транспортування на тихій воді та на регулярном хвилюванні при різних положеннях моделі відносно до фронту хвиль, а також в процесі влаштування в проектний стан. По результатам експерименту розроблені рекомендації по корегуванню конструктивного рішення та по вибору режиму буксировки та затоплення об'єкту.

Запроноване рішення застосовано Інститутом НІПішельф /м.Симферополь/ при розробці креслень платформ "Штормова-І7" /Чорне море, глибина 54 м/ та "Базова" /Чорне море, глибина 100 м/. В порівнянні з існуючими рішеннями економічна ефективність нових пропозицій підтверджена зниженням вартості монтажу відповідно на 37,7 та 45,6% і тривалості робіт в морі в 2-2,5 рази.

Результати проведених досліджень дозволяють зробити такі висновки:

1. Розв'язана крупна науково-технічна проблема проектування сталених стержневих конструкцій, що визначає вибір найкращого конструктивного рішення споруди, загальний характер якої підкреслюється не лише змінними, які при цьому розглядаються і включають параметри напружено-деформованого стану і геометричних схем конструкцій, але й можливістю розгляду в межах її вирішення різних окремих випадків, які зустрічаються на практиці. Універсальність розробленого методу рішення узагальненої задачі оптимального проектування забезпечена використанням обчислювальних процедур масштабування, аналізу чутливості, компенсації нев'язки, які підвищують ефективність запропонованого алгоритму, відсутність обмежень на кількість змінних і вимог, що враховуються, а також можливість застосування до оптимізації будь-якої системи, що апроксимується кінцево-елементною моделлю.

2. Розроблені наукові основи проектування сталених стержневих конструкцій, які містять у собі основні положення, узагальнені ознаки топологічного перетворення системи, особливості формування оптимальних геометричних схем і методику пошуку їх оптимальних параметрів. Загальні властивості оптимальних геометричних схем і їх взаємозв'язок з технічними умовами проектування, в тому числі і з вимогами уніфікації розмірів конструкції, обґрунтовані результатами числових досліджень різних конструктивних форм.

3. Виявлена стратегія пошуку оптимальних рішень для складних стержневих систем, які відрізняються наявністю елементів, що

знаходяться в різних напружених станах, і високою ступінню чутливості цільової функції до варіацій змінних параметрів. Досягнення оптимального результату забезпечується відповідним вибором початкового проекту і накладанням додаткових обмежень, що описують умови розподілу зусиль і матеріалу, закони зміни обрису вісей конструкції і значень зовнішніх навантажень, які залежать від параметрів оптимальних поперечних перерізів елементів і варіюваних їх довжин.

4. Розглянуті умови вибору оптимальної топології і геометрії комбінованих вантових систем і наскрізних опорних блоків морських стаціонарних платформ. За результатами аналізу їх оптимальних проектів, знайдених запропонованими аналітичним і числовим методами, розроблені рекомендації, які дозволяють зкомполювати раціональні конструктивні схеми на ранішній стадії проектування, що в кінцевому рахунку прискорює введення в експлуатацію об'єктів будівництва.

5. Теоретично і експериментально обґрунтовані нові технічні рішення опорних блоків МСП, які підтверджені авторськими свідоцтвами, а також їх основних несучих елементів – опорних стоек – у вигляді сталевобетонних стержнів кільцевого перерізу. Високу ефективність запропонованих рішень визначає скорочення строків монтажу в 2–2,5 рази, зниження витрат на оренду транспортних і вантажовідійомних засобів технічного флоту, підвищення до 30–40% несучої здатності споруди.

6. Розроблений метод оптимального проектування сталевих стержневих конструкцій з варіюваною геометрією і топологією, алгоритми прямого підбору двотаврових поперечних перерізів центрально- і позакентрово-стиснутих елементів, методика розрахунку міцності сталевобетонних тришарових стержнів, інженерна методика визначення хвильового навантаження на гідротехнічну споруду, рекомендації по вдосконаленню конструктивних форм конструкцій, а також пропозиції по створенню нових технічних рішень морських платформ підвищеної монтаждійсності знайшли застосування при проектуванні ряду реальних конструкцій покриття, рамних каркасів і морських стаціонарних платформ для Чорного моря, а також в учбовому процесі. Ефективність оптимальних рішень виявляється в зниженні матеріаломісткості об'єктів проектування від 8 /для ферм покриття/ до 30% і більше /для МСП/, а також вартості будівництва.

Основний зміст дисертації опубліковано в наступних роботах:

1. Пермяков В.О., Трофимович В.В. Визначення оптимальних параметрів один раз статично невизначених консольних вантових систем // Металеві та пластмасові конструкції, вип. I. - К.: Будівельник, 1969. - с. 99-106.

2. Трофимович В.В., Пермяков В.А. Проектирование предварительно-напряженных вантовых систем. - К.: Будівельник, 1970. - 140 с.

3. Трофимович В.В., Пермяков В.А., Мошкин Л.С. К вопросу о постановке задачи оптимального проектирования металлических предварительно-напряженных вантовых систем // Сопротивление материалов и теория сооружений, вып. I4. - К.: Будівельник, 1971. - с. I15-I24.

4. Пермяков В.А. Проектирование оптимальных предварительно-напряженных вантовых систем с балкой жесткости // Междунар. конгресс по легким конструкциям в наземном и промышленном строительстве. - Дрезден: 1972. - с. 961-963.

5. Пермяков В.А. Об определении оптимальных параметров предварительно-напряженных комбинированных вантовых систем // Изв. вузов. Стр-во и архит. - 1976. - № 9. - с. 43-49.

6. Пермяков В.А. Оптимизация геометрической схемы вантово-стержневых систем // Повышение эффективности металлических и деревопластмассовых конструкций / Под ред. М.М.Хербина. - К: Будівельник, 1978. - с. I4-21, 27-31.

7. Пермяков В.А. Оптимизация параметров геометрических схем вантовых конструкций // Международная ассоциация по мостам и конструкциям: Симпозиум. - М.: 1978. - с. 65-72.

8. Пермяков В.А. Параметры равнонапряженной балки жесткости комбинированных вантовых систем // Сопротивление материалов и теория сооружений, вып. XXXIII. - К.: Будівельник, 1978. с. I20-I26.

9. Пермяков В.А., Муваффах Мохамед. К определению параметров геометрической схемы комбинированных вантовых систем // Облегченные конструкции зданий: межвуз. сб. статей, вып. 7 - Ростов н/Д: РИСИ, 1980.

10. Трофимович В.В., Пермяков В.А. Оптимальное проектирование металлических конструкций. - К.: Будівельник, 1981. - I36 с.

11. Трофимович В.В., Пермяков В.А. Оптимизация металлических конструкций. - К.: Выща школа, 1983. - 199 с.

12. Пермяков В.А., Чибиряков В.К., Белов И.Д., Захаров Г.Е. Напряженно-деформированное состояние сталебетонного элемента

кольцевого сечения в осесимметричной постановке // Сопротивление материалов и теория сооружений, вып. 52. - К.: Будивельник, 1988. - с. 83-87.

13. Пермяков В.А., Белов И.Д., Рыжаков Н.Н. Исследование модели опорной части платформы в процессе транспортирования. Киев. инж.-строит. ин-т. - К.: 1988. - 25 с. - Деп. в УкрНИИТИ 29.09.1988, № 2501-Укр88.

14. Кошкин В.Д., Мельниченко Г.И., Пермяков В.А., Ременников А.М. Пакет прикладных программ "Поиск-1". - К.: Реклама, 1989. - 6 с.

15. Пермяков В.А. основные задачи оптимального проектирования стержневых систем // VI национальный конгресс по теоретической и прикладной механике: тез. докл. - Варна: 1989. - с.1.41.

16. Пермяков В.А., Белов И.Д. Центральное-жатые сталебетонные стержни кольцевого сечения // Изв. вузов. Стр-во и архит. - 1989. - № 9. - с.10-13.

17. Пермяков В.А., Ременников А.М. Комплекс программ для решения задач оптимизации стержневых конструкций // Металлические конструкции и испытания сооружений: межвуз. темат. сб. трудов. - Л.: ЛИСИ, 1989. - с.60-64.

18. Пермяков В.А., Чибирияков В.К., Белов И.Д., Захаров Г.Е. Методика расчета и определения напряженно-деформированного состояния сталебетонных стержней кольцевого сечения при различных видах нагружения / Инф. листок о научн.-техн. достижениях № 90-006. - К.: УкрНИИТИ, киев.отд. - 1990. - 4 с.

19. Пермяков В.А., Носова Л.А. Ременников А.М. Определение волновой нагрузки при оптимизации геометрической схемы опорных блоков МСП // Освоение углеводородных ресурсов шельфа. - М.: ВНИИОЭНГ, 1990. - с.32-40.

20. Пермяков В.А. Обобщенная задача оптимального проектирования стержневых систем // II междунар. научн. сессия "Актуальные проблемы строительства": докл. - Олыштын: 1990. - с.81-85.

21. Чибирияков В.К., Пермяков В.А., Захаров Г.Е., Белов И.Д. Напряженно-деформированное состояние сжато-изогнутых сталебетонных элементов кольцевого сечения // Металлические конструкции и испытания сооружений: межвуз. темат. сб. трудов. - Л.: ЛИСИ, 1991. - с.73-79.

22. Пермяков В.А., Ременников А.М. Оптимизация геометрических схем ферменных конструкций // Конструкции и основания:

конф. "Новые строительные материалы, конструкции и технологии". - Вильнюс: Техника, 1991. - с.39-42.

23. Берникер Я.С., Пермяков В.А. Технично-экономический анализ конструктивных решений стационарных платформ Азово-Черноморского региона. Киев. инж.-строит. ин-т. - К.: 1991. - 35 с. - Деп. в УкрНИИТИ 24.07.1991, № 1041-Ук91.

24. Пермяков В.А., Белов И.Д., Берникер Я.С. Сжато-изогнутые сталебетонные стержни кольцевого сечения // Нефтяные и газовые месторождения шельфа. - М.: ВНИОЗНГ, 1991. - с.34-39.

25. Пермяков В.А., Ремёнников А.М. Поиск геометрических схем металлических конструкций на основе методов нелинейного программирования // Совершенствование металлических конструкций / Под ред. М.М.Жербина. - К.: Наукова думка, 1992. - с.68-73.

26. Пермяков В.А., Белов И.Д. Центральное-сжатые и сжато-изогнутые сталебетонные стержни в морских стационарных платформах // Совершенствование металлических конструкций / Под ред. М.М.Жербина. - К.: Наукова думка, 1992. - с.214-221.

27. Пермяков В.А. Оптимизация геометрических схем стержневых систем // Изв. вузов. Стр.-во. - 1992, № 4. - с.12-15.

28. Пермяков В.А., Шаучквенас Г.Л. Оптимальное проектирование пространственных стержневых конструкций // Пром. стр.-во и инж. сооружения. - 1992. - № 1. - с.38.

29. Пермяков В.А. Оптимальное проектирование стальных стержневых конструкций /обзор работ/. Киев. инж.-строит. ин-т. - К.: 1992. - 78 с. - Деп. в УкрИНТЭИ 29.04.1992, № 535-Ук92

30. *Permyakov V.A., Remennikov A.M., General purpose code for steel structures optimal design // Computers and Structures, vol. 43, N6 - 1992 - p. 1155-1164.*

31. А.с. № 1178837. Морская стационарная платформа /Жербин М.М., Пермяков В.А., Нилов А.А., Берникер Я.С., Рыжаков Н.Н. /СССР/ / Открытия. Изобретения. - 1985. - № 34.

32. А.с. № 1373759. Морская стационарная платформа / Пермяков В.А., Нилов А.А., Иваненко П.А., Берникер Я.С. /СССР/ / Открытия. Изобретения. - 1988. - № 6.

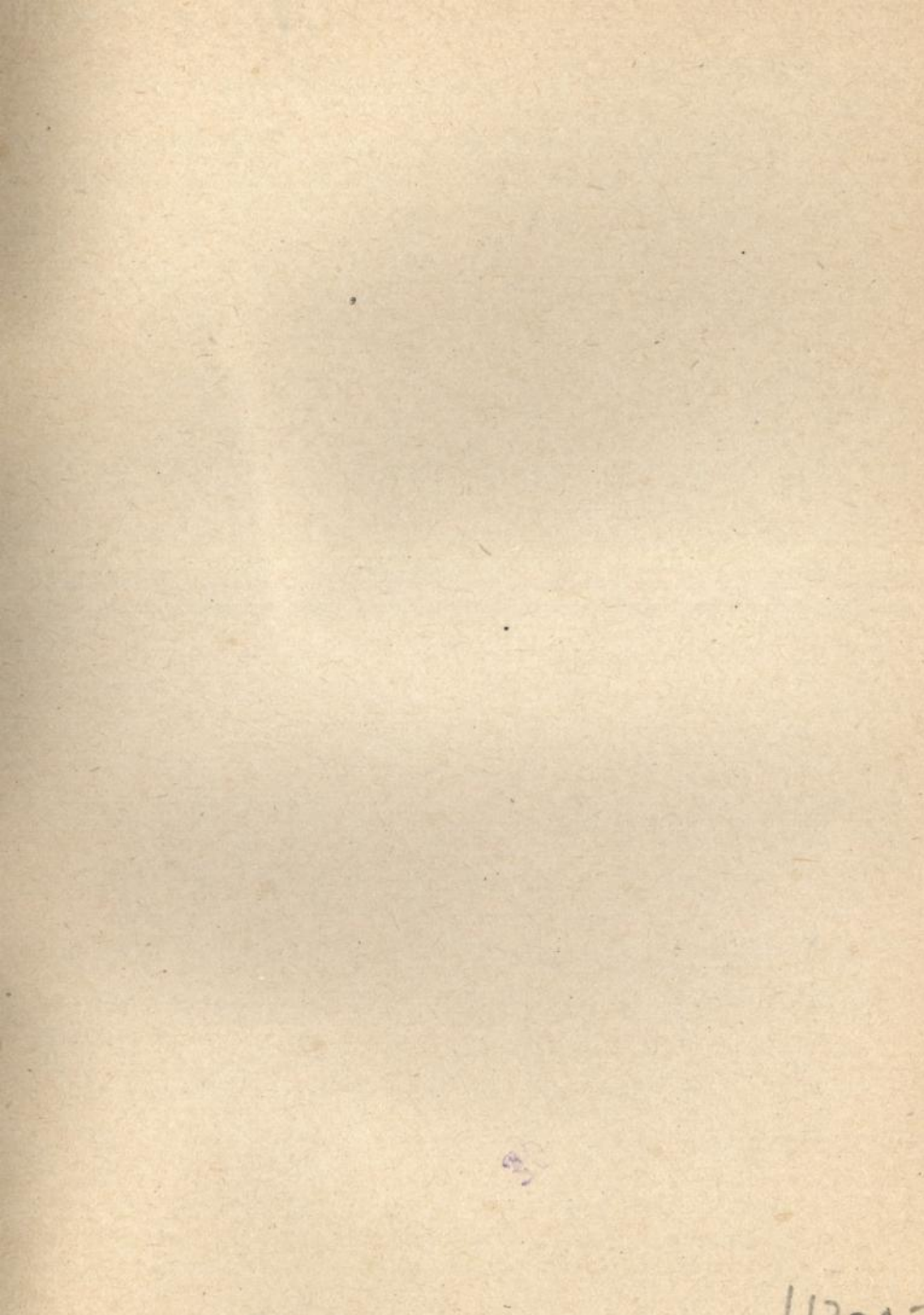
33. А.с. № 1384658. Морская платформа / Пермяков В.А., Нилов А.А., Иваненко П.А., Берникер Я.С., Рыжаков Н.Н. /СССР/ / Открытия. Изобретения. - 1988. - № 12.

34. А.с. № 1511331. Устройство для монтажа морской стационарной платформы / Берникер Я.С., Носова Л.А., Пермяков В.А. / СССР / Открытия, Изобретения. - 1989. - № 36.

35. А.с. № 1656070. Морская стационарная платформа / Берникер Я.С., Рыжаков Н.Н., Пермяков В.А., Степанов Н.А. / СССР / Открытия, Изобретения. - 1991. - № 22.

Підп. до друку 28.04.93. . Формат 60×84^{1/16}.
 Папір друк. №3 . Спосіб друку офсетний. Умовн. друк. арк. 2,09 .
 Умовн. фарбо-відб. 2,32 . Обл.-вид. арк. 1,0 .
 Тираж 100 . Зам. № Ч-62 . Безплатно.

Фірма «ВІПОЛ»
 252151, Київ, вул. Волинська, 60.



Безплатно

АВ 27.383