

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА І АРХІТЕКТУРИ

На правах рукопису

МУЦАНОВ Володимир Пилипович

**ДІЙСНА РОБОТА ТА НАДІЙНІСТЬ
МЕМБРАНИХ^Н КОНСТРУКЦІЙ**

Спеціальність 05.23.01 - Будівельні конструкції,
будівлі та споруди

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття вченого ступеня
доктора технічних наук

Одеса - 1997

АВ 37.055

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі "Металеві конструкції" Донбаської державної академії будівництва і архітектури

Науковий консультант - доктор технічних наук, професор

Горохов Євген Васильович

Офіційні опоненти:

1. Доктор технічних наук, професор

Пермяков Володимир Олександрович

2. Доктор технічних наук, професор

Перельмутер Анатолій Вікторович

3. Доктор технічних наук, професор

Пічугін Сергій Федорович

Провідна організація: ВАТ проєктний інститут "Дніпропроектсталь-конструкція" (ДніпрПСК), м. Дніпропетровськ

Захист відбудеться "15" квітня 1997 р. о "11" годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д.05.09.02 Одеської державної академії будівництва і архітектури за адресою: 270029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4, ОДАБА, ауд.210.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Одеської державної академії будівництва і архітектури за адресою: 270029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4, ОДАБА.

Автореферат розісланий "25" лютого 1997 р.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради

к.т.н., доц.

Малахова

Н.О.МАЛАХОВА

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



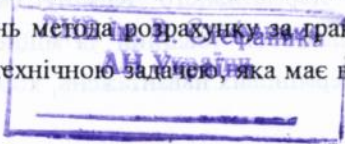
00751689 (-)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність проблеми. Галузь використання сучасних тонколистових металевих конструкцій є надзвичайно великою. Це і унікальні конструкції (великопрольотні покриття мембранного типу), і конструкції масового використання (резервуари, газгольдери, газовідвідні стволи витяжних багіт та т.і.). Загальний обсяг застосування тонколистових металевих конструкцій у недавньому минулому складав до 30% загального випуску конструкцій заводського виготовлення. Це обґрунтовано найбільш економічною витратою матеріалу, який роботає в них головним чином на розтяг, з'єднанням несучих та огорожувальних функцій, застосуванням передових методів технології виготовлення та монтажу.

Але, як відзначається рядом досліджень, ці конструкції мають більш високу чутливість до змінювання основних факторів, які впливають на напружно-деформований стан: геометричних та міцневих характеристик ісходного листового прокату, корозійної стійкості використовуємої сталі, температурно-вологісного режиму експлуатації, особливості монтажу. Урахування факторів, які мають вплив на надійність проектуємої конструкції, у рамках існуючого метода розрахунку за граничним станом здійснюється досить приблизно і через це здебільшого чи не дає потрібного економічного ефекту, чи навпаки, приводить до недостатнього рівню надійності проектуємої конструкції.

Створення єдиного методу розрахунку та проектування тонколистових металевих конструкцій з гарантованим рівнем надійності протягом заданого терміну експлуатації, який дозволяє врахувати імовірносний характер основних параметрів, які входять до розрахунку, та уточнення за підставою результатів виконаних досліджень окремих положень метода розрахунку за граничним станом є важливою науково-технічною задачею, яка має велике тео-



ретичне та практичне значення. Актуальність розробляемих проблем підтверджується висновками та рекомендаціями Українських науково-технічних конференцій з металевих конструкцій.

Робота виконувалася за особистою ініціативою автора та координувалася відповідно з програмою 0.55.01.121 "Розробити і впровадити прогресивні способи технічного переозброєння за рахунок максимального використання конструкцій експлуатуємих будівель та споруд", а також державної темі ДЗ-1-94 "Просторові оболонки покрить", яка виконувалася за дорученням Міністерства освіти України.

Мета і задачі роботи. Мета дисертаційної роботи - розв'язання актуальної науково-технічної проблеми забезпечення надійності мембранних металевих конструкцій за рахунок комплексного урахування на стадії проектування особливостей виготовлення конструкції, методів монтажу, режиму експлуатації.

Зазначена мета досягається за допомогою рішення таких задач: а) дослідження впливу зміну розрахункової схеми на різних етапах монтажу та експлуатації на напружно-деформований стан оболонок різної геометрії; б) розроблення методу урахування випадкових факторів (геометричних та міцневих характеристик проката, навантажень, корозійних умов експлуатації, геометричних недосконалостей) у розрахунках напружно-деформованого стану конструкції; в) розроблення на цій підставі імовірного методу розрахунку тонколистових металевих конструкцій та уточнення за його допомогою методики визначення коефіцієнта умов роботи; г) розроблення імовірного методу проектування тонколистових металевих конструкцій з заданим рівнем надійності за протягом нормативного терміну експлуатації; д) дослідження впливу мінливості товщини та міцневих властивостей листового проката, термінових навантажень, корозійних властивостей вико-

ристовуємої сталі, відхилень оболонки від заданої геометрії на надійність проектуємих конструкцій (великопрольотних покриттів мембранного типу); е) розроблення рекомендацій з розрахунку і проектування мембранних покриттів з метою урахування: впливу плануємого методу монтажу на напружно-деформований стан проектуємої конструкції; коефіцієнту умов роботи γ_c для окремих зон покриття, призначення товщини оболонки по зонах для створення конструкції, яка має мінімально необхідні запаси надійності; ж) перевірення основних тез розробленого методу розрахунку та проектування на тонколистових конструкціях інших видів (вертикальні циліндричні резервуари, газовідвідні стволи витяжних башт т.і.).

Методи досліджень. За основу розроблених методів розрахунку та проектування беруться концептуальні підходи теорії надійності та теорії граничних станів, що включають імовірносні розрахунки напружно-деформованого стану з урахуванням характерних для мембранних систем випадкових факторів, алгоритми чисельних та експериментальних досліджень за допомогою апарату будівельної механіки та теорії моделювання.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що: розроблена методика урахування зміну розрахункової схеми конструкції в процесі монтажу та експлуатації; запропоновано методику урахування імовірносного характеру факторів, які мають вплив на напружно-деформований стан конструкції, на етапі формування матриці жорсткості елементів; розроблено універсальний імовірносний метод розрахунку тонколистових металевих конструкцій, який дозволяє оцінити рівень надійності елементів, складаючих конструкцію; розвинуто методики визначення коефіцієнту умов роботи γ_c ; одержано залежності, які дозволяють виконати проектування конструкції з гарантованим рівнем надійності на протязі потріб-

ного терміну експлуатації.

Об'єкти досліджень. Основні об'єкти досліджень - великопрольотні покриття мембранного типу. Окремі теоретичні положення роботи перевірялися на вертикальних циліндричних резервуарах, газовідвідних стволах витяжних башт. Отримані в роботі результати можуть бути поширені і на інші тонколистові металеві конструкції.

Автор захищає: а) постановку та розв'язання проблеми забезпечення надійності тонколистових металевих конструкцій; б) результати натурного освідчення технічного стану унікальних великопрольотних покриттів мембранного типу (об'єкти Олімпіади-80); в) результати експериментальних досліджень великомасштабної моделі мембранного покриття; г) метод урахування "конструктивної нелінійності" та результати досліджень впливу послідовності монтажу на напружно-деформований стан великопрольотних мембранних оболонок покриттів різних типів; д) способи урахування імовірносного характеру факторів, які мають вплив на напружно-деформований стан, у розрахунках тонколистових металевих конструкцій; е) результати досліджень зміни товщини та міцневих властивостей листового прокату, корозійних властивостей застосовуємої сталі, геометричних недосконалостей, навантажень на показники надійності проектуємих тонколистових металевих конструкцій; ж) методу визначення коефіцієнту умов роботи γ_c та рекомендації щодо його призначення для деяких видів тонколистових металевих конструкцій; з) додаток до рекомендацій з розрахунку і проектування великопрольотних покриттів мембранного типу; і) метод розрахунку і проектування тонколистових металевих конструкцій з заданим рівнем надійності за протягом розглянутого терміну експлуатації.

Достовірність наукових положень роботи обумовлюється:

а) її побудуванням на підставі численних статистичних експериментальних даних з геометричних розмірів, міцневих характеристик, корозійного зносу листового прокату, навантажень; б) використанням загальноприйнятих розрахункових передумов і допущень, зокрема добре апробованим підходом до розв'язання нелінійних задач будівельної механіки за допомогою метода кінцевих елементів; в) доброю відповідністю наслідків розрахунку даним експериментальних досліджень, відомим аналітичним рішенням часткових задач; г) комплексним підходом до вирішення поставленої проблеми, у якому конструкція розглядається на усіх етапах проектування, монтажу та експлуатації; д) використанням апарату теорії надійності, що дозволяє оцінити достовірність отриманих результатів наукових досліджень.

Практична цінність роботи полягає в тому, що розроблений метод дозволяє забезпечити потрібний рівень надійності проектуємої тонколистової металевої конструкції на протязі необхідного періоду експлуатації, а також дозволяє оцінити рівень надійності існуючої конструкції на підставі даних обстеження. Для запропонованого методу розроблено алгоритм і програмний комплекс, який дозволяє виконати розрахунок та проектування конструкції з урахуванням зміни основних параметрів проектування та назначити раціональні запаси надійності проектуємої конструкції. Базування розрахунку на підставі методу кінцевих елементів дає можливість оснастити існуючі стандартні обчислювальні комплекси з розрахунку будівельних конструкцій розробленими імовірносними блоками. Запропонований метод розрахунку володіє достатньою універсальністю і при незначній модифікації може бути використаний для розрахунку та проектування інших видів металевих конструкцій. Розроблені додатки до рекомендацій з проектування великопролётних покриттів мембранного типу дозволять

здійснити на стадії проектування урахування впливу вибраного методу монтажу, умов експлуатації, марки сталі на напружно-деформований стан і надійність проектуємої конструкції.

Реалізація роботи. Результати досліджень реалізовано: а) при оцінюванні технічного стану та розробці системи заходів з технічної експлуатації унікальних великопрольотних покриттів спорт-комплексу "Олімпійський" на пр. Миру (Критий стадіон на 45 тис. глядачів та плавальний басейн); б) при проведенні досліджень з забезпечення надійності великопрольотних покриттів мембранного типу (Універсальний спортивний зал "Ізмайлово", футбольно-легкоатлетичний комплекс та універсальний спортивний зал ЦСКА) разом з МНДІТЕП у рамках програми 0.55.01.121; в) при оцінюванні надійності та розробці заходів з забезпечення нормальної експлуатації вертикальних циліндричних резервуарів об'ємом $V=1000-30000 \text{ м}^3$ Слов'янської, Вуглегорської, Запорізької ГРЕС, ВО Донавототрансбуд; г) при розробці технічних умов ТУ У 22026170.003-96 "Конструкції будівельні сталеві резервуарів вертикальних циліндричних для нафти і нафтопродуктів об'ємом від 100 до 3000 м^3 " (інформацію надруковано у зборнику "Технічні умови України. Бібліографічний покажчик (за II квартал 1996 р.)" - УкрЦСМС, Київ, 1996); д) при оцінюванні надійності та розробці заходів з забезпечення нормальної експлуатації газовідвідних стволів витяжних башт ВО "Стірол"; е) при розробці проектів об'єктів Макіївського металургійного комбінату, Новоліпеського металургійного заводу, Авдіївського коксохімзаводу, виконаних Державним проектним та науково-дослідним інститутом Донецький ПромбудНДЦпроект; ж) у учбовому процесі Донбаської державної академії будівництва і архітектури, аспірантами та магістрами кафедри металевих конструкцій ДДАБА у вигляді методичних вказівок з проектування мембранних покриттів.

Апробація роботи. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та знайшли своє відображення у друкованих виданнях на міжнародних конференціях: "Aerodynamics and hydrodynamics buildings" (CSSR, High Tatras, 1989), "Надійність будівель і споруд" (Черкаси, 1993), "Матеріали для будівельних конструкцій. ІСМВ-94" (Дніпропетровськ, 1994), IX-th International Conference "Metal structures" (Krakow, Poland, 1995), Асоціації "Просторові конструкції (Москва, 1995), "Прогресивні металеві і дерев'яні конструкції" (Одеса, 1995), "Екологія і ресурсозбереження" (Макіївка, 1995), "Металобудівництво-96". Стан та перспективи розвитку (Макіївка, 1996), "Thin-walled metal structures". European workshop (Wroclaw, Poland, 1996);

весоюзних науково-технічних семінарах: "Індустріальні технічні рішення для реконструкції будівель та споруд промислових підприємств" (Макіївка, 1986), "Прогресивна технологія і організація будівельно-монтажних робіт при реконструкції промислових підприємств" (Київ, 1987);

на всесоюзних тематичних конференціях і координаційних нарадах: "Ефективні залізобетонні і сталезалізобетонні просторові конструкції для будівництва у районах Сибіру" (Красноярськ, 1983), "Прогресивні просторові конструкції і перспективи їх застосування" (Свердловськ, 1985), "Підвищення ефективності і вдосконалення проектування, досліджень, виготовлення і монтажу металевих конструкцій" (Жданов, 1985), науково-практичній конференції з просторових конструкцій (Ростов-на-Дону, 1988);

на Українських науково-технічних конференціях з металевих конструкцій (Сімферополь, 1988; Київ, 1992; Миколаїв, 1996);

на науково-технічних конференціях Донбаської державної академії будівництва і архітектури (Макіївка, 1986, 1992, 1993).

У повному обсязі закінчену дисертаційну роботу заслухано на

кафедри "Металеві конструкції" ДДАБА та на засіданні Асоціації кафедр металевих конструкцій ВУЗів СНД (Ліпецьк, 1994).

Публікації. Основні положення дисертації знайшли своє відображення у 23 публікаціях, у тому числі в монографії та навчальному посібнику. Одержано 1 авторське свідоцтво.

Обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, сьоми розділів, основних результатів і висновків, списку літератури з 224 назв на 26 с. і додатків. Роботу викладено на 390 с., у тому числі 252 с. основного тексту, 58 рис. на 52 с., 35 табл. на 34 с., 26 с. додатків.

ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обгрунтовано актуальність розробляємої теми, сформульовані мета та завдання досліджень, коротко викладено основні результати, одержані автором у ході досліджень, наведено відомості про їх практичну реалізацію.

У першій главі виконано огляд існуючих форм мембранних металевих конструкцій, проведено аналіз факторів, які мають вплив на їх напружно-деформований стан, розглянуто чисельні та аналітичні методи розрахунку тонкостінних оболонок, їх детерміністична та імовірнісна реалізація, виконано огляд існуючих методів розрахунку надійності конструкцій. У ході проведеного аналізу відділені фактори, які мають вплив на напружно-деформований стан та надійність тонколистових металевих конструкцій (ТЛМК). Вивченню роботи конструкцій за наявності корозійного зносу, геометричних недосконалостей присвячено роботи М.М.Пісанко, С.Л.Кантора, О.О.Амірова, В.В.Болотіна, Б.П.Макарова, В.П.Малкова, Р.М.Магомедова, І.Г.Овчиннікова, Х.А.Сабітова, О.Р.Ржаніцина, О.О.Уманського, Є.О.Єгорова, А.В.Сільвестрова. Важливий вплив зміни розрахункової схеми великопрольотних покриттів мембранного типу під час монтажу конструкції на її кін-

цевий напружено-деформований стан, а також загальні методи їх розрахунку і проектування, розглянуто в роботах В.І.Трофімова, П.Г.Єремєєва, Л.І.Гольденберга, І.Л.Ружанського, К.М.Ілленко, Г.С.Веденікова та інших авторів. Однак, основними моментами, які зменшують коректність проведених досліджень, є уявлення окремих мембранних полотнищ еквівалентними за перерізом гнучкими нитками або шарнірними стержнями, використання принципу суперпозиції для аналізу систем, які роботають нелінійно, проведення досліджень, в основному, для початково плоских покриттів на прямокутному плані. Окремі питання розрахунку тонколистових оболонок з урахуванням конструктивної нелінійності розглянуто в роботах Н.П.Абовського, Л.В.Єнджієвського, В.М.Кислокого, М.В.Шапошнікова та інш.

Мінливість факторів, які мають вплив на напружено-деформований стан досліджуємих конструкцій, диктують необхідність використання імовірносних методів їх розрахунку. Своє найбільш повне втілення ідеї трактування проблеми надійності будівельних конструкцій знайшли у роботах О.Р.Ржаніцина, В.В.Болотіна, С.А.Тімашева, А.П.Кудзіса, О.Я.Дривінга, Б.Й.Снарскіса, М.С.Стрелецького, М.М.Складнева, Ю.І.Шокіна та інш. Великий внесок до розробки окремих положень розглядаємої проблеми внесли С.Ф.Пічугін, В.А.Пашинський, В.М.Гордєєв, А.В.Перельмутер. Приблизні методи розрахунку надійності на підставі квазістатистичних методів для окремих видів тонколистових конструкцій, зокрема для вертикальних циліндричних резервуарів, розроблялися у роботах В.А.Пріцкера, А.М.Айзена. На жаль, більшість розроблених підходів не мають достатньої універсальності, використовують вузько спеціалізовані блоки імовірносного розрахунку НДС, які не дозволили створити, у зв'язку з тим, універсальний метод розрахунку надійності ТЛМК, а також недо-

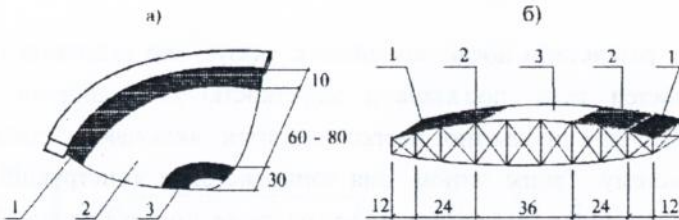
статньо пристосовані до комплексного урахування дефектів локального характеру.

Проблемі оптимізації отриманих проектних рішень на підставі аналізу чутливості проекту до зміни перемінних присвячені роботи К.Б.Роджіані, Дж.Л.Бейлі, Е.Атрека, Р.Л.Галлагера, К.М.Резделла, О.К.Зенкевича, Є.Дж.Хога, К.Чоя, В.Комкова, В.М.Картвелішвілі, М.В.Банічука, Ф.Л.Черноусько. У кінці глави на підставі проведеного аналізу сформульовано основні задачі дослідження, які складають наукову новизну роботи.

У другій главі виконано статистичний аналіз факторів, які мають вплив на НДС досліджуваних конструкцій. Дослідження статистичних закономірностей при змінюванні товщини та міцневих властивостей вихідного листового прокату виконано для сталей ВСтЗсп5, 09Г2С, 14Г2, 10ХСНД, що рекомендовані до використання в тонколистових металевих конструкціях. Отримані дані добре узгоджуються з аналогічними дослідженнями, виконаними для резервуарних сталей В.А.Пріцкером.

У ході вивчення корозійного зносу великопрольотних покриттів мембранного типу було використано методику, розроблену в роботах Є.В.Горохова і В.П.Корольова, що припускає системний аналіз вивчення умов експлуатації конструкції з дальшим комплексним урахуванням можливих експлуатаційних станів і технологічних режимів функціонування конструкції. Дослідження корозійного зносу мембранної оболонки покриття виконано для зон з характерним температурно-вологістним режимом (центральна, периферійна, приконтурна зони) з реєстрацією параметрів ТВР по цілорічному циклу "зима - весна - літо - осінь". Результати досліджень наведено на Рис.1.

Проведений аналіз результатів замірів ТВР і корозійного зносу оболонок дозволяє зробити висновки про характерність для біль-



а) Критий стадіон с/к "Олімпійський" (14Г2 по ГОСТ 19282-73*): $t_0^0 = 5\text{mm}$, $\bar{t}_0 = 4.78\text{mm}$, $\dot{t}_0 = 0.19\text{mm}$; $\bar{t}_c^3 = 4.2\text{mm}$:

б) ФЛК і УСЗ ЦСКА (ВСтЗкп2 по ГОСТ 380 - 71*):

$t_0^0 = 2.5\text{mm}$, $\bar{t}_0 = 2.42\text{mm}$, $\dot{t}_0 = 0.09\text{mm}$; $\bar{t}_c^1 = 0\text{mm}$;

1 - приконтурна зона ; 2 - периферійна зона; 3 - центральна зона; \bar{t}_c - залишкова товщина листа через 5 - 7 років експлуатації.

Рисунок 1. - Розподіл корозійного зносу на поверхні покриття

шості цивільних будівель, які перекриті великопрольотними мембранними конструкціями, слабоагресивного середовища у внутрішньому просторі та агресивного - на зовнішній поверхні мембрани, тобто у місці контакту поверхні мембрани з мокрим мінераловатним утеплювачем, використання якого є типовим для більшості теплих покрівель. Швидкість корозійного зносу залежить від зони покриття і дорівнює 0.01 - 0.12 мм/рік для низьколегованої сталі типа 14Г2 і 0.01 - 0.5 мм/рік для ВСтЗкп2. Таким чином, результати виконаного аналізу указують на необхідність урахування при імовірносному розрахунку конструкцій температурно-вологісний режим її експлуатації, сталь, локальний характер корозійного руйнування, яке проходить неоднаково по площі покриття.

Дослідження геометричних недосконалостей (мається на увазі відхилення оболонки покриття від заданої форми) зафіксоване за допомогою багаторазових геодезичних зйомок, дозволило зробити висновок про явну перевагу недосконалостей, які отримані конструкцією покриття на стадіях монтажу та експлуатації. Порі-

вняння результатів дослідних зйомок указує, що величина недосконаlostей тісно пов'язана з жорсткістю як підпорної конструкції, так і прольотної частки покриття, включаючи стабілізуючу систему. Таким чином, для тонколистових конструкцій, що мають підвищену деформативність не лише при експлуатації, але й здебільшого на стадії монтажу, при розрахунку та аналізі напружено-деформованого стану є необхідним урахування дійсної послідовності монтажу, за допомогою якого формується оболонка.

Як свідчить проведене вивчення навантажень, якнайбільший вплив на НДС великопрольотних мембранних покриттів, що мають порівняно невелику частку постійного навантаження в їх загальній масі, чинить снігове навантаження. На жаль, недостатній обсяг виборки даних (2 - 3 снігомірні зйомки для різних типів покриттів) не дозволяє виконати статистичний аналіз зміну формовідкладання снігового навантаження на поверхні покриття, що описується коефіцієнтом μ . Однак, якісний аналіз, у поєднанні з фіксацією найбільш сніжної зими 1985 - 1986 рр., дозволяє зробити висновок про необхідність розрахунку мембранних покриттів на два стану снігового навантаження: 1 - рівномірно-розподілене навантаження, що виникає під час снігопаду і викликає максимальне напруження та пружні деформації в конструкції, яка обчислюється ($\mu = 1$); 2 - нерівномірно-розподілене навантаження, що виникає внаслідок підтанування та сповзання снігу з крутих ділянок покриття, викликає максимальні кінематичні переміщення і можливі розлади покрівельного клімату, технологічного обладнання. Приблизні значення μ приведено на Рис. 2.

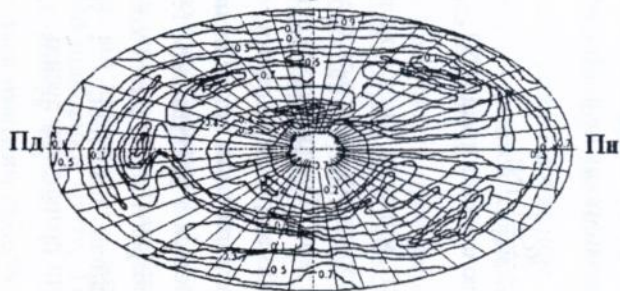
Застосування в ТЛМК монтажних сполук типу, наведеного на Рис.3, як показав досвід обслідування Критого стадіону на пр. Миру, поєднано з присутністю ряду недоліків.

Третя глава присвячена розробці методу урахування послі-

Оболонки позитивної кривизни на овальному плані

Карти снігових навантажень

3



Циліндричні оболонки на квадратному плані

/ покрівля з великими тепловими втратами /



Запропоновані значення μ

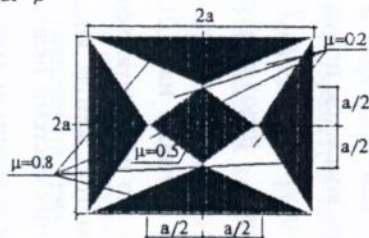
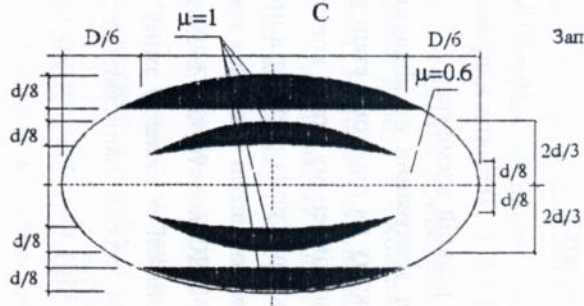
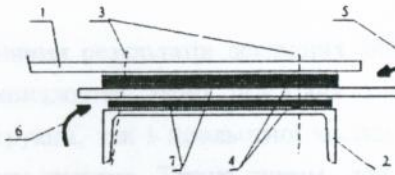


Рисунок 2. - Запропоновані значення снігових навантажень



1 - мембрана; 2 - верхній по-яс стабілізуючих ферм; 3 - осі високомішних болтів; 4 - стружка після свердління отворів; 5 - течі води внаслідок порушення цілосності гідроізоляції; 6 - підсання вологи зсередини; 7 - продукти шілевої корозії.

Рисунок 3. - Вузол сполуки мембрани з стабілізуючою фермою

довності монтажу на НДС формуємої оболонки. Оскільки кон-струкції, що розглядаються, надто деформативні, то їх розрахунок за допомогою метода кінцевих елементів (МКЕ) зводиться до розв'язання системи нелінійних алгебраїчних рівнянь, які одержуються розкладанням основного рівняння МКЕ у ряд Тейлора за вектором $\{\delta\}$. Використаний у роботі метод покрокового навантаження у поєднанні з простими ітераціями дозволив, у зв'язку з лінеарізацією задачі у рамках кроку навантаження, відмовитися від нарахунку матриці $[K_L(\{\delta\})]$, враховуючи нелінійні ефекти у вигляді додатку

$$[K_{\sigma}(\{\delta\})]_e = \frac{\partial [CL]}{\partial \{\delta\}_e} \cdot \{N\}_e \quad (1)$$

де $[CL]$ - матриця направляючих косинусів; $\{N\}_e$ - вектор вузлових реакцій елемента.

Для урахування послідовності монтажу запропоновано підхід, при якому на першому етапі розрахунку задається схема, що відповідає кінцевому стану конструкції. Однак жорсткостні характеристики відсутніх елементів приймаються нульовими, а вузли, що з'єднують відсутні елементи - закріпленими від зміщення, і розрахунок НДС конструкції виконується з урахуванням геометричної нелінійності. У випадку зміну розрахункової схеми конструкції на нульові строки записуються дійсні значення, і з урахуванням отриманих на попередньому етапі розрахунку зусиль, у геоме-

трично нелінійній постанові повторюється розрахунок відновленої розрахункової схеми.

Для дослідження впливу послідовності монтажу на НДС оболонок великопрольотних покриттів мембранного типу виконано варіювання безрозмірних жорсткостних параметрів конструкції покриття, отриманих з розглядання умов спільної роботи оболонки та підпірної конструкції. Частина з наведених нижче параметрів притягнуто з работ В.І.Трофімова, П.Г.Єремеєва, О.О.Уманського:

$$\begin{aligned} \bar{D}_1^h &= \frac{EI_{k,y}^h}{Ea^3} = \frac{EI_{k,x}^h}{Etb^3} = 1.35 \cdot 10^{-4} + \infty; & \text{для оболонок нульової} \\ \bar{D}_1 &= \frac{EA_{k,x} \cdot a}{EtbR} = \frac{EA_{k,y}}{Eta} = 0.5 + \infty; & \text{кривизни на прямо-} \\ & & \text{кутному плані;} \\ \bar{D} &= \frac{ab}{Rl} = 1782 + 4807; & \\ \bar{D}_1^h &= \frac{EA}{Etr} = 2.5 \cdot 10^{-3} + \infty; & \text{для оболонок позитивної кри-} \\ \bar{D} &= \frac{R}{\Gamma} \cdot 4 \sqrt{\frac{t^2}{12(1-\mu^2)R^2}} = 6.27 \cdot 10^{-3} + 13 \cdot 10^{-3}, & \text{визни на круглому плані} \end{aligned} \quad (2)$$

де індекси x,y для оболонок нульової кривизни указують на орієнтацію сторін довжиною 2a і 2b уздовж координатних осей у та x; R і r - радіуси кривизни поверхні та плану оболонки; t - товщина мембрани.

Деякі результати проведених досліджень приведено на Рис. 5, де: а) для покриттів на прямокутному плані (1 - монтаж постелі; 2 - розкатання рулонів мембрани; 5 - навантаження від покрівлі; 6 - снігове навантаження): ---- - на гнучкому підпорному контурі $\bar{D}_1^h \approx 1.35 \cdot 10^{-4}$; - - - - - на жорсткому підпорному контурі $\bar{D}_1^h \approx 2.5 \cdot 10^{-3}$; б) для покриттів на круглому плані, які складаються монтажними блоками (1 - монтаж блоків, розпір яких сприймається терміновими траверсами; 2 - розкружалівання; 3 - навантаження від покрівлі; 4 - навантаження від снігу): ----- - податливий підпорний контур $\bar{D}_1^h \approx 2.5 \cdot 10^{-3}$; - нерухомий підпорний контур $\bar{D}_1^h \approx \infty$. в) для покриттів на круглому плані, що складаються навісним способом (1 - монтаж постелі, розпір

сприймається траверсами; 2 - розкружалівання покриття; 3 - 6 - розкатання рулонів мембрани; 7 - навантаження від покрівлі; 8 - навантаження від снігу).

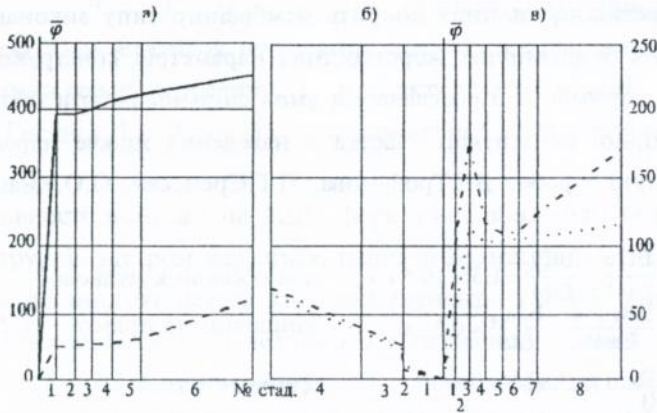


Рисунок 4. - Змін відносного прогину по стадіях монтажу $\bar{\varphi} = \frac{W_{max}}{t}$

Як видно з наведених рисунків, НДС оболонки на різних стадіях монтажу змінюється нелінійно, і основні переміщення та зміни геометрії система одержує в період чіплення постелі, що пояснюється малою жорсткістю конструкції в горизонтальній площині на перших етапах розрахунку. Необхідне урахування зміну НДС оболонки внаслідок впливу послідовності монтажу можна здійснити за допомогою коректування результатів розрахунку традиційної кінцевої розрахункової схеми за допомогою виправляючих коефіцієнтів, які наведені в таблиці 1.

Вплив послідовності монтажу та інших факторів у остаточному підсумку позначається на надійності проектуємої конструкції. Тому у **четвертій главі** розглянуті питання формулювання критеріїв надійності та чутливості проектуємої конструкції до зміну перемінних проектування. Як основа, закладено підхід, сформульова-

Таблиця 1 - Виправляючі коефіцієнти для урахування послідовності монтажу навісним способом(розкаткою рулонів мембрани)

План	Тип контура	виправляючі коефіцієнти			
		$\bar{\alpha}$	$\bar{\beta}$	$\bar{\gamma}$	$\bar{\omega}$
Прямокутний	гнучкий	3.0 - 3.4	0.93 - 0.96	3.1 - 3.2	0.6 - 0.8
	жорсткий	1.45 - 1.75	0.92 - 0.95	1.3 - 1.4	0.91 - 0.94
Круглий	нерухомий	1.4 - 1.9	0.4 - 1.4	-	-
	податливий	2.9 - 3.8	0.8 - 3.0	9.5 - 13.2	0.9 - 0.95

$$\text{де } \bar{\alpha} = \frac{\varphi_{knl}}{\bar{\varphi}_{kl}}; \bar{\beta} = \frac{\sigma_{np, \max, knl}}{\bar{\sigma}_{np, \max, kl}}; \bar{\gamma} = \frac{M_{on, k, knl}}{\bar{M}_{on, k, kl}}; \bar{\omega} = \frac{N_{on, k, knl}}{\bar{N}_{on, k, kl}}$$

ний О.Р.Ржаніциним, у якому під надійністю елемента конструкції мається на увазі забезпечення виконання нерівності

$$\bar{Y} = \bar{R} - \bar{S} \geq 0, \quad (3)$$

де \bar{R} - узагальнена несуча здатність конструкції; \bar{S} і \bar{Y} - узагальнене навантаження на конструкцію та резерв її несучої здатності.

Оскільки щільність розподілу функції \bar{Y} у загальному вигляді відрізняється від нормального, то для урахування цього факту використано ряд Грама-Шарль'є, першим членом якого є функція щільності нормального розподілу F_0 , а другий та третій члени ряду $\varphi^{(2)}, \varphi^{(3)}$ - похідні від функції нормального розподілу з відповідальними коефіцієнтами S і E , що дають можливість урахувати цю різницю

$$p(\bar{Y}) = F_0(\gamma) - \frac{1}{6} S \varphi^{(2)}(\gamma) + \frac{1}{24} E \varphi^{(3)}(\gamma), \quad (4)$$

$$\text{де } \gamma = \frac{\bar{R}_y^n - \bar{\sigma}_{np}}{\sqrt{\hat{R}_y^n + \hat{\sigma}_{np}}}$$

О.Р.Ржаніциним; $\bar{R}_y^n, \bar{\sigma}_{np}$ - математичні сподівання нормативного опору сталі з границі текучості та зведених напружень для плоского напруженого стану; $\hat{R}_y^n, \hat{\sigma}_{np}$ - дисперсії величин.

Математичне сподівання $\bar{\sigma}_{np}$ одержано на підставі розкладання відомої формули зведених напружень для плоского напруженого стану по величинам діючих зусиль N_x, N_y, N_{xy} і товщині елемента t у ряд Тейлора з утриманням 2-х перших членів ряду

$$\bar{\sigma}_{np} = \sqrt{\bar{\sigma}_x^2 + \bar{\sigma}_y^2 - \bar{\sigma}_x \bar{\sigma}_y + 3\bar{\tau}_{xy}^2} + \frac{\delta N_x(2\bar{N}_x - \bar{N}_y) + \delta N_y(2\bar{N}_y - \bar{N}_x) + 6\delta N_{xy}\bar{N}_{xy}}{2t\sqrt{\bar{N}_x^2 + \bar{N}_y^2 - \bar{N}_x\bar{N}_y + 3\bar{N}_{xy}^2}} - \frac{\delta t}{t^2} \sqrt{\bar{N}_x^2 + \bar{N}_y^2 - \bar{N}_x\bar{N}_y + 3\bar{N}_{xy}^2}; \quad (5)$$

$$\bar{\sigma}_{np} \approx \frac{\sqrt{\bar{N}_x^2 + \bar{N}_y^2 - \bar{N}_x \cdot \bar{N}_y + 3\bar{N}_{xy}^2}}{t};$$

Дисперсію $\hat{\sigma}_{np}$ визначено, як центральний момент другого порядку

$$\hat{\sigma}_{np} = \frac{[\delta N_x(2\bar{N}_x - \bar{N}_y)]^2 + [\delta N_y(2\bar{N}_y - \bar{N}_x)]^2 + 36(\delta N_{xy}\bar{N}_{xy})^2 + t^{-2}}{t^2(\bar{N}_x^2 + \bar{N}_y^2 - \bar{N}_x\bar{N}_y + 3\bar{N}_{xy}^2)} \Rightarrow \frac{[\delta t(\bar{N}_x^2 + \bar{N}_y^2 - \bar{N}_x \cdot \bar{N}_y + 3\bar{N}_{xy}^2)]^2}{t^2}; \quad (6)$$

Розробка підходу до аналізу чутливості зводиться до відшукування залежності між показником надійності $\psi = p(Y)$ і товщиною оболонки t

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial t} + \frac{\partial\psi}{\partial\{\delta\}} \cdot \frac{\partial\{\delta\}}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

Позовну залежність запропоновано відшукати в аналітичному вигляді з деякими спрощеннями

$$\frac{d\psi}{dt} \approx \frac{\partial(F_0(\gamma))}{\partial\gamma} \cdot \frac{\partial\gamma}{\partial t} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \exp^{-0.5\gamma^2} \cdot \frac{\partial\gamma}{\partial t}, \quad (8)$$

$$\text{де } \frac{\partial\gamma}{\partial t} = \frac{(\hat{R}_y^n + \hat{\sigma}_{np})^{0.5} \left(-\frac{\partial\hat{\sigma}_{np}}{\partial t}\right) - 0.5 \left(\frac{\partial\hat{\sigma}_{np}}{\partial t}\right) (\bar{R}_y^n - \bar{\sigma}_{np}) (\hat{R}_y^n + \hat{\sigma}_{np})^{0.5}}{\hat{R}_y^n + \hat{\sigma}_{np}}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial \bar{G}_{np,i}}{\partial \bar{t}_i} = -\frac{1}{t^2} \left[\bar{N}_{np}^i + \frac{(2\bar{N}_x^i - \bar{N}_y^i) \hat{N}_x^i + (2\bar{N}_y^i - \bar{N}_x^i) \hat{N}_y^i + 6\hat{N}_{xy}^i \bar{N}_{xy}^i}{2\bar{N}_{np}^i} - 2\frac{\hat{t}_i \bar{N}_{np}^i}{\bar{t}} \right], \quad (10)$$

$$\frac{\partial \hat{G}_{np,i}}{\partial \bar{t}_i} = -\frac{2 \left[2\frac{\hat{t}_i}{\bar{t}} \bar{N}_{np}^i + \hat{N}_x^i (2\bar{N}_x^i - \bar{N}_y^i)^2 + \hat{N}_y^i (2\bar{N}_y^i - \bar{N}_x^i)^2 + 36 \hat{N}_{xy}^i \bar{N}_{xy}^i \right]}{\bar{t}^3 \cdot \bar{N}_{np}^i}; \quad (11)$$

$$\bar{N}_{np}^{i,2} = \bar{N}_x^{i,2} + \bar{N}_y^{i,2} - \bar{N}_x^i \bar{N}_y^i + 3\bar{N}_{xy}^{i,2}; \quad (12)$$

З метою вирішення оптимізаційної задачі, у ході якої, замість традиційних підходів, проектується конструкція, яка має мінімально необхідні запаси надійності, застосовано узагальнений безпараметричний метод зовнішньої точки вирішення дискретних мінімаксних задач

$$\varphi(\{t\}, \alpha) = \sum_{\psi_i > \alpha} (\psi_i - \alpha)^2 + \sum_{\psi_i < \psi_n} \omega_i (\psi_n - \psi_i)^2; \quad (13)$$

$$\{t\}_{j+1} = \{t\}_j - \rho \cdot \text{Ln} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \{t\}_j} \right); \quad (14)$$

$$\alpha_{j+1} = \alpha_j + \left[\varphi(\{t\}_j, \alpha_j) / nm \right]^{0.5} \quad (15)$$

де $\varphi(\{t\}, \alpha)$ - мінімізуема допоміжна функція; α - нижня оцінка допоміжної функції; ω, ρ - відповідні вагові коефіцієнти.

У **п'ятій главі** розглянуто методи урахування недосконалостей, дефектів та пошкоджень під час виконання імовірносних розрахунків. Корозійні пошкодження запропоновано вважати рівномірно розподіленими у межах кінцевого елемента, а математичне сподівання та стандарт товщини кінцевого елемента з урахуванням корозійного зносу визначати, як

$$\bar{t}_{k,e} \approx \bar{t}_{0,e} \cdot \bar{\alpha}_{k,e} \cdot \bar{\alpha}_{p,e}; \quad (16)$$

$$\hat{t}_{k,e} \approx \bar{t}_{0,e} (\bar{\alpha}_{k,e} \cdot \hat{\alpha}_{p,e} + \hat{\alpha}_{k,e} \cdot \bar{\alpha}_{p,e}), \quad (17)$$

де $\bar{t}_{0,e}, \bar{t}_{k,e}, \hat{t}_{k,e}$ - математичне сподівання і стандарт початкової товщини кінцевого елемента, а також товщини, обчисленої з урахування корозійного зносу; $\bar{\alpha}_{k,e}, \bar{\alpha}_{p,e}, \hat{\alpha}_{k,e}, \hat{\alpha}_{p,e}$ - математичні сподівання і стандарти коефіцієнтів, що ураховують рівномірний і нерівномірний характер корозії елемента, і визначаються в залежності від агресивності середовища, характеру корозійних впливів,

марки сталі, орієнтації елемента в просторі.

$$\bar{\alpha}_{k,e} - \alpha_k - \hat{c} \cdot \alpha_k^0 \cdot \bar{t}_{0,e} \cdot \exp^{\ln \Gamma + \hat{c}} \cdot [1 + \lg a_k(1 + \bar{c})]; \quad (18)$$

$$\bar{\alpha}_{p,e} = 1 - \frac{2k_p \gamma_p}{\bar{\alpha}_k} \left(1 - \bar{\alpha}_{k,e} + \frac{\hat{\alpha}_{k,e}}{\bar{\alpha}_{k,e}} \right); \quad (19)$$

$$\hat{\alpha}_{k,e} = \hat{c} \cdot \left[\alpha_k^0 \cdot \bar{t}_{0,e} \cdot \exp^{\ln \Gamma + \hat{c}} [1 - \hat{c} - \lg a_k(1 + \bar{c} + 2\hat{c} + \hat{c}\bar{c})] \right]^2; \quad (20)$$

$$\hat{\alpha}_{p,e} = \hat{\alpha}_{k,e} \cdot \left[\frac{2k_p \gamma_p}{\bar{\alpha}_k^2} \cdot \left(1 + \frac{2\hat{\alpha}_{k,e}}{\bar{\alpha}_{k,e}} \right) \right]^2; \quad (21)$$

де T - розрахунковий термін експлуатації елемента; α_k^0 - коефіцієнт, залежний від схеми корозійного руйнування елемента; a_k - корозійні збитки сталі для елементів, що розташовані у межах зони з однорідним температурно-вологістним режимом; k_p - коефіцієнт пітингоутворення; γ_p - коефіцієнт щільності корозійного руйнування, c - коефіцієнт, що враховує вплив продуктів корозії на кінетику корозійного процесу.

Для урахування можливих геометричних недосконалостей, що виражаються у відхиленнях поверхні оболонки від утворюючої, запропоновано поряд з традиційними глобальною (X, Y, Z) та локальною (x, y, z) ввести поняття 3-ї "деформованої" системи координат ($\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}$), що ураховувала би можливі відхилення вузлів плоского трикутного кінцевого елемента відносно локальної системи координат. Перевага запропонованого підходу полягає в тому, що матриця жорсткості кінцевого елемента, що нарахована в локальних координатах $[\bar{K}_0]_e$, вже зберігає інформацію про можливі відхилення вузлів елемента від заданого положення, і у подальшому може бути використана у традиційних операціях МКЕ

$$[\bar{K}_0^a]_e = [C\tilde{L}]^T [\bar{K}_0^a]_e [C\tilde{L}]; \quad (22)$$

де $[\bar{K}_0^a]_e, [\bar{K}_0^a]_e$ - матриці жорсткості кінцевого елемента, виражені, відповідно в деформованій та локальній системах координат

$$[C\tilde{L}]_e = \delta_{ij} + \sum_{\alpha=1}^3 \sum_{k=1}^3 \frac{\partial e_i^k}{\partial x_j^k} \cdot \Delta z_i^k; \quad \text{- матриця направляючих косинусів, що}$$

зв'язує локальну і деформовану системи координат (δ - символ Кронекера, e^i - орти деформованої системи координат).

При тому, імовірносний додатак, що враховує імовірносні відхилення і є дисперсією матриці жорсткості кінцевого елемента, ви-

значиться виразом

$$[\hat{K}_0^{\#}] = \sum_{i=1}^{Nl} \left(\frac{\partial [K_0]}{\partial \{\Delta z_i\}} \right)^2 \cdot \Delta z_i + \sum_i^{Nl} \sum_j^{Nl} \left(\frac{\partial [\bar{K}_0]}{\partial \{\Delta z_i\}} \right) \cdot \left(\frac{\partial [\bar{K}_0]}{\partial \{\Delta z_j\}} \right) \cdot \rho_{ij}^{\#} \cdot (\Delta z_i - \Delta z_j)(\Delta z_j - \Delta z_i) \quad (23)$$

$\rho_{ij}^{\#}$ - коефіцієнт кореляції випадкових перемінних Δz_i и Δz_j - складаючих вектора математичних сподівань вузлових відхилень.

У шостій главі дисертаційної роботи розглянуто деякі питання реалізації імовірносного методу розрахунку у формі МКЕ та проектування, який реалізовано у вигляді програмного комплексу "КОРОНА", що є орієнтований на використання РС IBM-сумісного типу. Оскільки усі відзначені фактори, за винятком навантажснь, чинять вплив на ліву частину рівняння МКЕ, урахування одночасного впливу випадкових факторів можна здійснити на стадії формування матриці жорсткості приблизно, розглядаючи матрицю жорсткості конструкції, як нелінійну функцію випадкових аргументів. При тому, математичне сподівання та дисперсія функції в цьому випадку буде визначатися виразами

$$[\bar{K}] \approx [\bar{K}_0(\bar{t}_0, \bar{t}_k, \bar{z})] + [\bar{K}_\sigma(\bar{t}_0, \bar{t}_k, \bar{z})] + [\hat{K}_0]; \quad (24)$$

$$[\hat{K}_0] \approx [\hat{K}_0^t] + [\hat{K}_0^{\#}], \quad (25)$$

де $[\hat{K}_0^t]$, $[\hat{K}_0^{\#}]$ - складаючі дисперсії матриці жорсткості, обумовлені мінливістю початкової товщини проката, його корозійного зноса, геометричних недосконалостей, відповідно.

На першому етапі формується $[\bar{K}]$ - матриця жорсткості конструкції, обчислена на підставі математичних сподівань входних параметрів, та $[\hat{K}]$ - додаткова матриця жорсткості, що ураховує зміну цих параметрів. Далі, за допомогою розкладу в ряд Тейлора визначається математичне сподівання вектора вузлових переміщень $\{\delta\}$ та його можливе відхилення $\{\hat{\delta}\}$, визначаються компо-

ненти вектору вузлових реакцій $\{N\}$, значення математичного сподівання та дисперсії зведених напружень $\{\bar{\sigma}_{np}\}$ та $\{\hat{\sigma}_{np}^2\}$, показники надійності кінцевих елементів $\{\psi\}$. На підставі розробленої процедури оптимізації відшукуються величини $\{\Delta t\}$, переобчислюються значення матриць жорсткості кінцевих елементів і процес повторюється до виконання граничних умов.

У **сьомій главі** розглянуто питання використання результатів проведених досліджень у рамках методу граничних станів. Відзначені вище фактори (за винятком навантажень) мають вплив на ступень відміни реальної розрахункової схеми від ідеалізованої і можуть бути урахованими за допомогою коефіцієнта умов роботи γ_c . Розглядання характеристики безпеки у координатах $\bar{R} - \bar{\sigma}$ дозволяє одержати вираз для визначення γ_c , що ураховує вищенаведені фактори

$$\gamma_c = 1 - \frac{\left(\frac{\sigma_{np}}{1 - \mu_{\sigma} \nu_{\sigma}} - \sigma_{np}^0 \right) \cdot \gamma_m \cdot \gamma_f}{\bar{R}^2 (1 - \mu_r \nu_r)}, \quad (26)$$

де $\bar{\sigma}_{np}, \nu_{\sigma}$ - математичне сподівання та коефіцієнт варіації зведених напружень, обчислених з урахуванням зміну факторів, маючих вплив на НДС конструкції; μ_r, μ_{σ} - число стандартів, на яке зсувається нормоване значення випадкової величини у відношенні до її математичного сподівання для забезпечення вимагаємої безпеки; σ_{np}^0 - зведені напруження в елементі, обчислені в детермінованій постановці.

За допомогою розробленого підходу виконано оцінку впливу випадкових факторів на надійність елементів конструкції, рівень яких $P=0.95$ забезпечується відповідними коефіцієнтами умов роботи. Так, урахування мінливості початкової товщини листового прокату рекомендується здійснити за допомогою коефіцієнта $\gamma_{c(t)}$ (див. табл. 2); урахування можливого корозійного зносу оболонки, зробленої зі сталей ВСтЗсп (С255) або 09Г2С (С345) та експлуатуємої 10 років - середній строк між двома фарбуваннями, що виконуються під час капітальних ремонтів, - за допомогою $\gamma_{c(c)}$

(див. табл. 3); геометричні недосконалості - за допомогою коефіцієнта $\gamma_{c(g)}$ (див. табл. 4). Значення у дужках приведені для низьколегованої сталі типу 09Г2С.

Таблиця 2 - Рекомендовані значення $\gamma_{c(t)}$

План	Тип контура	Зони		
		Пр	Пф	Ц
Прямокутний	гнучкий	0.92 (0.94)	0.96 (0.97)	0.98 (0.99)
	жорсткий	0.93 (0.95)	0.95 (0.96)	0.90 (0.93)
Круглий	нерухомий	0.96 (0.97)	0.94 (0.95)	0.92 (0.93)
	податливий	0.94 (0.95)	0.90 (0.93)	0.88 (0.91)

Таблиця 3 - Рекомендовані значення $\gamma_{c(c)}$

План	Сталь	Зони		
		Пр	Пф	Ц
Прямокутний	C255	0.91	0.92	0.88
	C345	0.92	0.93	0.89
Круглий	C255	0.90	0.91	0.90
	C345	0.96	0.96	0.96

Таблиця 4 - Рекомендовані значення $\gamma_{c(g)}$

План	Контура	Зона	Значення $\gamma_{c(g)}$ для Δz		
			0.00027R	0.00038R	0.00107R
Круглий	нерухомий	Приконтурна	0.99 (0.99)	0.98(0.99)	0.98(0.98)
		Периферійна	0.95 (0.96)	0.94(0.95)	0.91(0.94)
		Центральна	0.77 (0.83)	0.75(0.82)	0.72(0.80)
	податливий	Приконтурна	1.08(1.06)	1.07(1.05)	0.99(1.01)
		Периферійна	1.05(1.04)	1.0(1.0)	0.92(0.95)
		Центральна	1.07(1.05)	0.96(0.97)	0.83(0.88)

Δz - середня величина відхилень від проектної геометрії, у залежності R (початкового радіусу кривизни), що визначається по даним виконавчої геодезичної зйомки.

Розроблені методи розрахунку та проектування можуть бути поширеними і на інші види тонколистових металевих конструкцій. Так, визнаючи існуючі підходи до урахування відхилень стінки вертикальних циліндричних резервуарів від проектного положення (М.М.Пісанко, Є.О.Єгорова, Х.Хабашне, Б.Г.Ісмагулова та інші.), використання алгоритму, розробленого у главах 4, 5, 6, і послідоюча обробка результатів варіантів розрахунків за формулою (26) дозволила одержати значення складової коефіцієнта умов роботи $\gamma_{c(s)} = 0.9-1.0$, що урахує відхилення стінки вертикального циліндричного резервуара від вертикалі при розрахунку на міцність для резервуарів $V=20000 \text{ м}^3$ при рівні забезпечення значень $P = 0.95$.

Проведені за допомогою розробленого методу дослідження впливу снігових навантажень на надійність елементів, складаючих конструкцію, для великопрольотних покриттів мембранного типу (циліндричних на прямокутному плані та провисаючих на круглому) дозволили оцінити змін цих показників залежно від нормованого терміну експлуатації споруди та її конструктивної форми. Для опису снігових навантажень застосовано добре опробований розподіл Гумбеля з параметрами, що характерні для III снігового району відповідно БНіП 2.01.07.-85 (використано дані, наведені у роботах В.О.Отставнова та Л.С.Розенберга). Результати досліджень, що наведені у таблиці 5, при дальшому накопиченні статистичного матеріалу з снігових навантажень, можуть стати основою для удосконалення значень коефіцієнта μ , що урахує характер відкладень снігового навантаження на покритті.

Для систем, розрахунок НДС яких може виконуватися досить простими аналітичними методами, або поверхня яких може бути апроксимована малою кількістю кінцевих елементів, запропоновано більш вимогливий підхід до визначення коефіцієнта γ_s . Прак-

Таблиця 5 - Результати досліджень впливу мінливості снігових навантажень на надійність елементів конструкції

План	Кон-тур	D=ab/Rt	Сталь	Зона	Покази. надійності для терміну, років			
					10	25	50	100
Прямокутний	гнучкий	1784	С255	Пр	0.9997	0.9995	0.9990	0.9973
				Пф	1.0	1.0	1.0	1.0
				Ц	1.0	1.0	1.0	1.0
			С345	Пр	1.0	1.0	1.0	1.0
				Пф	1.0	1.0	1.0	1.0
				Ц	1.0	1.0	1.0	1.0
	4807	С255	Пр	0	0	0	0	
			Пф	0.9544	0.9317	0.9032	0.8746	
			Ц	0.9999	0.9996	0.9987	0.9962	
		С345	Пр	0.6594	0	0	0	
			Пф	0.9918	0.9853	0.9765	0.9658	
			Ц	1.0	1.0	1.0	1.0	

Зони: Пр - приконтурна, Пф - периферійна; Ц - центральна.

точно, визначення γ_c зводиться до одержання виборки значень можливої величини γ_r і вилічування її із умови

$$P(\gamma_c, \gamma_r) = Nad, \quad (27)$$

де γ_r - значення γ_c , одержані при варіюванні відповідних параметрів; Nad - потрібний рівень надійності.

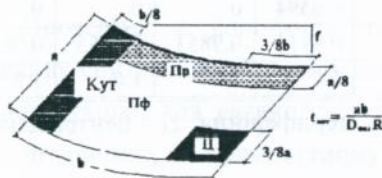
Умова (27) зводиться до розв'язання інтегрального рівняння, якщо відома функція щільності розподілу $p(\gamma_r)$, вида

$$1 - Nad = \int_0^{\gamma_c} p(\gamma_r) d\gamma_r. \quad (28)$$

З метою апробації розробленої методики визначення коефіцієнту умов роботи γ_c виконано їх нормування для циліндричних оболонок газовідвідних стволів витяжних башт, зроблених з корозійностійких сталей. Імовірносний характер задачі визначався мінливістю товщини та міцності листового проката труби, а також величиною зазорів у місцях опирання труби на упори. На підставі

використання методів статистичного моделювання із заданою імовірністю у поєднанні з результатами обслідування конструкцій (обсяг виборки дорівнює 384 вимірювання) при імовірності відказу $P = 0.015$ і $\mu_r = 1.64$ отримано значення $\gamma_c = 0.85$.

Враховуючи залежність можливих параметрів (навантаження, зниження товщини оболонки внаслідок корозійного зносу (див. формули 17 - 22) від фактора часу, стає можливим, у наслідку застосування розробленої процедури оптимізації, одержати оптимальне, з точки зору зайвих запасів надійності, проектне рішення для заданого строку експлуатації. Запропонований підхід застосовано для оптимізації проектних рішень циліндричних мембранних



покрить. Результати досліджень для покрить, виготовлених із сталі С255, на гнучкому контурі наведено у таблиці 5 та на Рис.6.

$$\bar{D}_0 = \frac{ab}{Rt_0}, \quad \bar{D}_{opt} = \frac{ab}{Rt_{opt}}$$

Рисунок 5. - Визначення оптимальної товщини мембрани

Таблиця 6 - $t_{opt}(мм)$ по зонах оболонки для терміну експлуатації (років)
($a=36м, b=48м, t_0=4мм, \bar{D} = 1.35 \cdot 10^{-4}; \bar{D}'_0 = 1782, м-л - С255$)

Зона	без урахування кор. зносу				з урахуванням кор. зносу			
	10	25	50	100	10	25	50	100
Кут	4.0	4.5	4.5	7.0	4.5	4.5	6.0	8.0
Пр	2.5	2.5	3.5	3.5	3.5	4.0	4.0	4.5
Пф	2.2	2.2	2.5	2.8	3.0	2.8	3.5	4.0
Ц	2.0	2.0	2.0	2.5	2.2	2.8	3.0	4.0

У наведених рекомендаціях з розрахунку і проектування мембранних покрить запропоновано урахування: впливу плануємого методу монтажу на напружно-деформований стан проектуємої конструкції; коефіцієнту умов роботи для окремих зон покриття,

призначення товщини оболонки по зонах для створення конструкції, яка має мінімально необхідні запаси надійності.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ І ПІДСУМКОВІ ВИСНОВКИ

1. Розв'язано важливу науково-технічну проблему забезпечення надійності мембранних металевих конструкцій за рахунок комплексного урахування на стадії проектування особливостей їх виготовлення, застосованих методів монтажу, режиму експлуатації.

2. Розроблена методика обслідування великопрольотних покриттів мембранного типу дозволила оцінити технічний стан унікальних об'єктів Олімпіади-80 у Москві, виділити основні фактори, що мають вплив на показники їх надійності та визначити їх статистичні характеристики.

3. За допомогою розробленого універсального методу розрахунку тонколистових металевих конструкцій на підставі запропонованих методик урахування можливого характеру недосконалостей та навантажень, досліджено вплив мінливості міцневих властивостей і товщини листового прокату, корозійної стійкості, геометричних недосконалостей, снігових навантажень на показники надійності елементів мембранного покриття та рекомендовані відповідні окремі коефіцієнти надійності $\gamma_{c(t)}$, $\gamma_{c(e)}$, $\gamma_{c(g)}$.

4. На підставі запропонованого методу урахування зміни розрахункової схеми в процесі монтажу та експлуатації конструкції досліджено вплив навісного та блочного способів монтажу на кінцевий напружно-деформований стан мембранних покриттів на круглому та прямокутному плані і рекомендовано систему коректуючих коефіцієнтів $\bar{\alpha}$, $\bar{\beta}$, $\bar{\gamma}$, $\bar{\omega}$ для уточнення кінцевих значень прогинів та зведених напружень в мембранній оболонці, а також зусиль у підпорному контурі.

5. За допомогою запропонованого підходу до оптимізації проектного рішення мембраної конструкції на підставі критерія мінімуму необхідних запасів надійності оболонки розроблено імовірносний метод проектування і на його основі отримані проектні рішення оболонок покрить з гарантованим рівнем надійності для заданого терміну експлуатації.

6. Розроблені методи розрахунку і проектування поширені на інші види тонколистових металевих конструкцій (газовідвідні стволи витяжних башт, стінки вертикальних циліндричних резервуарів).

Основний зміст дисертації викладено у таких публікаціях:

1. Е.В.Горохов, В.Ф.Мущанов, А.М.Югов, С.В.Колесниченко, В.Н.Васильев. Алгоритмы расчета стальных конструкций. / под ред. Е.В.Горохова. - М., Стройиздат, 1989 - 368 с.

2. Е.В.Горохов, В.Ф.Мущанов, В.Н.Васильев, А.А.Ягмур. Обследование и испытание несущих конструкций зданий и сооружений. - К., УМКВО, 1991 - 156 с.

3. Е.В.Горохов, Г.С.Ведеников, В.Ф.Мущанов. Применение висячей оболочки при реконструкции покрытия. // Промышленное строительство и инженерные сооружения. - 1986, №2, с. 4-5.

4. Г.С.Ведеников, В.Ф.Мущанов. Расчет висячей цилиндрической ортотропной оболочки покрытия производственного здания. // В межвуз. сб. "Висячие покрытия и мосты". - Воронеж, изд. ВГУ, 1986, с. 100-106.

5. Е.В.Горохов, В.Ф.Мущанов. Применение висячих оболонок при реконструкції покриттів виробничих будівель // В кн. "Реконструкція промислових будівель і споруджень". - М.: Стройиздат, 1988, с.120-123.

6. В.Ф.Мущанов, Г.С.Ведеников. Влияние податливости опорной вантовой системы на напряженно-деформированное состоя-

ние висячей ортотропной оболочки. // В межв. сб. "Висячие конструкции покрытий и мостов". - Воронеж, изд.ВГУ, 1988,с. 23-31.

7. А.Ф.Даниленко, В.Ф.Мущанов, Г.С.Ведеников. Расчет квадратной мембраны на гибком опорном контуре. // Известия вузов. Строительство и архитектура. - 1988, №5, с. 21-24.

8. Е.В.Горохов, В.П.Королев, В.Ф.Мущанов. Контроль несущей способности стальных конструкций покрытия. // Строительные материалы и конструкции. - 1988, №4, с. 24-25.

9. Е.В.Горохов, В.П.Королев, В.Ф.Мущанов. Прогнозирование вероятностного срока службы несущих металлоконструкций с учетом режима эксплуатации. // В сб. научных трудов "Новые технологические решения для строительной промышленности Донбасса". - К., УМКВО, 1989, с. 98-107.

10. В.Ф.Мущанов. К расчету мембранных конструкций с учетом геометрической нелинейности. // В сб. научных трудов "Прогрессивные конструкции и материалы для строительства в условиях Донбасса". - К., УМКВО, 1991, с. 56-67.

11. Мущанов В.Ф. Учет влияния геометрических несовершенств в расчетах тонколистовых металлических конструкций. // Надежность и реконструкция зданий и сооружений: Сб. науч. тр.: А.М.Югов (отв.ред.) - Макеевка: ДонИСИ, 1994. - 103 с. - с. 37-42.

12. Мущанов В.Ф., Гибаленко В.А. К расчету нитей конечной жесткости сквозного сечения. // Надежность и реконструкция зданий и сооружений: Сб. научн. тр.: А.М.Югов (отв.ред.) - Макеевка: ДонИСИ, 1994. - 103 с. - с. 43 - 47.

13. Мущанов В.Ф. Проектирование большепролетных покрытий мембранного типа с учетом геометрических несовершенств. // Ресурсосбережение и экология промышленного региона: Сб. научн. тр. в 3 т. - Макеевка, ДГАСА, 1995. - т. 2. - С. 99 -102.

14. Мущанов В.Ф. Оптимизация проектных решений больше-

пролетных покрытий мембранного типа // Вестник Донбасской государственной академии строительства и архитектуры. - Макеевка: ДГАСА, 1996. - вып. 1-95. - С. 40 - 43.

15. Мушанов В.Ф. Основные рекомендации по проектированию и эксплуатации большепролетных покрытий мембранного типа / Вестник Донбасской государственной академии строительства и архитектуры. Макеевка: ДГАСА, 1996. - вып. 96-1(2). - С. 26-29.

16. Горохов Е.В., Мушанов В.Ф., Королев В.П. Обеспечение надежности большепролетных покрытий мембранного типа // Известия вузов. Строительство. - 1996, №8. - С. 31 - 35.

17. А. с. №867546. Кондуктор для поперечной газокислородной резки Н-образного профиля. // Я.М.Лихтарников, А.Г.Беккер, В.Н.Васильев, В.Ф.Мушанов. - Опубл. в БИ №36, 1981.

18. В.Ф.Мушанов. Экспериментальное и теоретическое исследование работы висячей ортотропной оболочки покрытия производственного здания с подвесными кранами. // Деп. во ВНИИИС, № 6014, 1985. - БИ ВНИИИС Госстроя СССР, вып. 6, 1985 г.

19. В.Ф.Мушанов, Г.С.Ведеников. Теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния висячей ортотропной оболочки покрытия ангара для самолетов. // Деп. во ВНИИИС, №7316, 1986. - БИ ВНИИИС Госстроя СССР, вып. 3, 1987 г.

20. В.Ф.Мушанов, В.В.Губанов. Методика определения коэффициента условий работы на примере расчета газоотводящих труб на прочность. // Деп. в ДНТБ Украины. 25.01.1995. N 177 - Ук95.

21. Е.Горохов, В.Мушанов. Результаты натурных исследований снеговых нагрузок на висячие покрытия. // Zbornik prednasok s konferencie "AERODINAMICS AND HYDRODYNAMICS BUILDINGS". High Tatras. - Strbske Pleso CSSR, 1989, с. 189-194.

22. Mushchanov V.F. Probability-based method of calculation and

design for sheet structures. - The ninth International conference "Metal structures" 26 - 30 June 1995, Krakow (Poland). Preliminary report. Volume 2, pp. 179-187.

23. Mushchanov V. Probabilistic-optimum design of sheet structures. - EUOREPAN WORKSHOP "Thin-walled steel structures" 25-27 September 1996, Wroclaw (Poland), pp. 121-125.

Особистий внесок автора - розробка у роботах: [1] - алгоритмів формування навантажень та матриць жорсткості елементів; [2],[8], [21] - методів обслідування та виконання експериментальних досліджень мембранних конструкцій; [3],[4],[5],[6],[7],[12],[16],[19], [20] - методів розрахунку та проектування оболонок, виконання чисельних досліджень; [9] - методів урахування недосконалостей; [17] - конструкції кондуктора.

АНОТАЦІЇ

Мушчанов В.Ф. "Действительная работа и надежность мембранных конструкций". Диссертация в виде рукописи на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.01 - Строительные конструкции, здания и сооружения. Одесская государственная академия строительства и архитектуры. - Одесса, 1996.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической проблемы обеспечения надежности мембранных конструкций за счет комплексного учета на стадии проектирования особенностей их изготовления, метода монтажа, режима эксплуатации. На основе статистического анализа факторов, влияющих на надежность мембранных конструкций, разработан универсальный вероятностный метод их расчета. Предложены методы учета вероятностного характера дефектов и несовершенств в форме, удобной для расчета с помощью метода конечных элементов, методы определения и значения коэффициентов условий работы, обеспечива-

ющие требуемый уровень надежности проектируемой конструкции при использовании метода предельных состояний. Разработан метод оптимального проектирования тонколистовых конструкций, гарантирующий требуемый уровень надежности проектируемой конструкции в течение заданного срока эксплуатации.

Mushchanov V.F. "Actual behaviour and reliability of membrane structures". Dissertation in manuscript for degree of the Technical Science Doctor on 05.23.01 speciality - Building constructions, buildings and structures. Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odessa, 1996.

The dissertation is concerned with the solution of important scientific and technical problems of safety guaranteeing for sheet structures by means of the complex account of their manufacture peculiarities, assembling methods, operation conditions. The universal probability-based method of calculation is presented on the basis of statistical analysis of parameters influenced safety level of sheet metal structures. Methods accounting for the probabilistic nature of defects and imperfections are suggested in the form convenient for the finite element's method using. The methods and values of partial safety factors are given and guarantee the required margin of safety for a structure designed. The universal optimum design method is elaborated and guarantee the required safety level of a structure in the course of required lifetime.

Ключові слова: геометрична та конструктивна нелінійність, напружно-деформований стан, метод кінцевих елементів, надійність, імовірність, характеристики розподілу, тонколистові металеві конструкції, мембрани покриття, дефекти та недосконалості, оптимальне проектування.

Заказ 06/97
Тираж 100 экз.
Отпечатано в ДГАСА

~~РИС~~_{РМБ}

435389

AB 37.055