

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кунта Ольга Євгенівна

УДК 534.1(075.8)

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ БАГАТОПРОГОНОВИХ
ДОВГОМІРНИХ КОНСТРУКЦІЙ З УРАХУВАННЯМ
ДІЇ СТАТИЧНИХ І ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

Спеціальність 05.02.09 – динаміка та міцність машин

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки і техніки України
Кузьо Ігор Володимирович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри механіки
та автоматизації машинобудування

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Ярошевич Микола Павлович,
Луцький Національний технічний університет,
завідувач кафедри обладнання лісового комплексу
та теорії механізмів машин

кандидат технічних наук, доцент
Дзюба Лідія Федорівна,
Львівський державний університет
безпеки життєдіяльності,
доцент кафедри прикладної математики і механіки

Захист відбудеться 21 червня 2017 р. о 15⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.06 у Національному університеті «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. С. Бандери, 12, 61 ауд. XIV навч. корпусу).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий 19 травня 2017 р.

Учений секретар спеціалізованої
вченої ради к. т. н., доцент

Шоловій Ю. П.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Багатопрогонові довгомірні конструкції знайшли широке застосування у сучасних машинах та інженерних спорудах. До таких конструкцій належать щогли, стріли та інші опорні елементи підйимально-транспортних машин, вежі бурових установок, мости, опори ліній електропередач та установок вітрової енергетики, надземні дільниці магістральних трубопроводів тощо. Згадані технічні об'єкти відіграють важливу роль у забезпеченні держави паливно-енергетичними і сировинними ресурсами, а також у розвитку енергетики, машинобудування, будівництва, транспорту та інших галузей народного господарства.

Основним критерієм працездатності довгомірних конструкцій є їхня стійкість під дією статичних або динамічних навантажень. Саме тому проблемі стійкості механічних систем у науковій літературі приділяється значна увага. Класичні задачі стійкості довгомірних конструкцій зводяться до знаходження і аналізу фундаментальних розв'язків диференціальних рівнянь зігнутої осі стрижня. Для дослідження стійкості застосовують також енергетичні та динамічні критерії. У зв'язку з однотипністю задач про вільні коливання та про стійкість пружних систем, ці задачі нерідко розв'язують у спільній постановці, розробляють спільні алгоритми розрахунку власних частот, критичних навантажень, а також власних форм коливань та форм деформування на межі стійкості. Незважаючи на широкий розвиток аналітичних і чисельних методів розрахунку інженерних конструкцій на стійкість і коливання, треба констатувати, що переважна більшість досліджень, проведених у даній галузі, стосується однопрогонових механічних систем. Разом з тим, побудова математичних моделей, розроблення раціональних методів і узагальнених алгоритмів розрахунку багатопрогонових довгомірних конструкцій на стійкість і коливання є важливим і актуальним науково-практичним завданням.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційні дослідження виконувалися відповідно до наукового напрямку кафедри механіки та автоматизації машинобудування Національного університету «Львівська політехніка» – «Динаміка, міцність та надійність механічних систем, автоматизація виробництв і технічна діагностика обладнання», а також у межах науково-дослідних робіт «Розроблення методів статичного і динамічного розрахунку елементів конструкцій з концентраторами напружень» (№ державної реєстрації 0109U001158), 2009–2011 рр.; «Створення імпульсного полічастотного вібраційного технологічного обладнання» (№ державної реєстрації 0115U000433), 2015–2016 рр.; «Проведення дослідницьких робіт для опрацювання прототипу інноваційного підйимального крана вантажністю 100 тонн» (договір № 367 на створення науково-технічної продукції між Національним університетом «Львівська політехніка» і фірмою HYDROMET, Sp. z o. o., Польща), 2015–2016 рр.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – удосконалення методології розрахунку багатопрогонових довгомірних конструкцій на стійкість за рахунок розроблення узагальнених математичних моделей аналізу напружено-деформованого стану з урахуванням східчастої або неперервної зміни згинної жорсткості і поздовжньої сили по довжині, податливості опор і з'єднувальних вузлів, а також дії статичних і динамічних навантажень.

Досягнення поставленої мети включало розв'язання таких задач:

- розроблення математичної моделі аналізу напружено-деформованого стану багатопрогонової висотної конструкції в процесі втрати статичної стійкості з урахуванням східчастої зміни згинної жорсткості і поздовжньої сили по висоті, а також податливості опор і з'єднувальних вузлів та опрацювання раціонального алгоритму числової реалізації математичної моделі;

- побудова і числова реалізація математичної моделі аналізу напружено-деформованого стану і розрахунку багатопрогонової висотної конструкції на стійкість та вільні коливання з урахуванням неперервної зміни згинної жорсткості і поздовжньої сили по висоті, а також податливості опор і з'єднувальних вузлів;

- розроблення математичної моделі аналізу напружено-деформованого стану, статичної стійкості і вільних коливань складеної багатопрогонової висотної конструкції пілонного типу, та проведення досліджень особливостей втрати стійкості А-подібної бурової вежі;

- побудова математичної моделі напружено-деформованого стану трипрогонової конструкції магістрального трубопроводу, що включає надземну і прилеглі до неї підземні ділянки і перебуває під дією температурних навантажень та визначення поздовжніх зусиль, переміщень і деформації труби на надземній та на підземних ділянках;

- проведення експериментальних досліджень особливостей локального ослаблення надземної ділянки магістрального трубопроводу у зв'язку з макророзшаруванням матеріалу труби в процесі тривалої експлуатації та дослідження впливу локального ослаблення на стійкість трубопроводу;

- побудова математичної моделі і алгоритму розрахунку на стійкість багатопрогонової ділянки магістрального трубопроводу з урахуванням дії температурних навантажень і взаємодії труби з пружною основою та проведення досліджень стійкості надземної ділянки магістрального трубопроводу;

- розроблення методу дослідження поздовжньо-поперечного згину багатопрогонової висотної конструкції в умовах дії періодичного осьового навантаження, згідно з яким розрахунок споруди на динамічну стійкість зводиться до аналізу розв'язків диференціального рівняння Матьє.

Об'єкт дослідження – поздовжньо-поперечний згин багатопрогонових довгомірних конструкцій.

Предмет дослідження – забезпечення стійкості багатопрогонових довгомірних конструкцій з урахуванням східчастої або неперервної зміни згинної жорсткості і поздовжньої сили по довжині, а також дії статичних і динамічних навантажень.

Методи дослідження стійкості і коливань багатопрогонових довгомірних конструкцій ґрунтуються на застосуванні теоретичних засад механіки континуально-дискретних механічних систем. Під час побудови математичних моделей напружено-деформованого стану висотних конструкцій і магістральних трубопроводів застосовано технічну теорію згину та теорію балок С. Тимошенка. Для розв'язання систем диференціальних рівнянь, що описують поведінку довгомірних конструкцій зі ступінчастою або неперервною зміною згинної жорсткості і поздовж-

ньої сили, застосовано широко апробовані аналітичні та чисельні методи у поєднанні з матричним методом початкових параметрів. Розв'язання задач на власні числа здійснювали за допомогою апробованого програмного забезпечення. Розміри локально ослабленої зони труби в системі магістральних трубопроводів визначали за допомогою ультразвукового товщиноміра, а механічні характеристики матеріалу експлуатованої труби – із застосуванням переносного твердоміра та шляхом лабораторних випробувань зразків на розтяг.

Наукова новизна одержаних результатів. *Дістала подальшого розвитку методологія розрахунку багатопрогонних висотних конструкцій на стійкість за рахунок розроблення узагальнених математичних моделей аналізу напружено-деформованого стану із застосуванням як технічної теорії згину, так і неklasичної теорії балок С. Тимошенка та з урахуванням зміни згинної жорсткості і поздовжньої сили по довжині, а також податливості пружних зв'язків секцій та конструкції з основою.*

*Удосконалено метод розрахунку на стійкість багатопрогонних довгомірних конструкцій, що перебувають під дією температурних навантажень і включають прогони, встановлені на пружній основі. На прикладі надземної ділянки магістрального трубопроводу *вперше* оцінено сумісний вплив температурних напружень, взаємодії підземних прогонів трубопроводу з пружною основою, а також локальних ослаблень труби на стійкість довгомірної конструкції.*

Вперше запропоновано методологію розрахунку на динамічну стійкість багатопрогонних довгомірних конструкцій, що перебувають під дією періодичних осьових навантажень, на основі застосування континуально-дискретних розрахункових моделей та зведення задачі про поперечні коливання конструкції до аналізу розв'язків системи диференціальних рівнянь Мат'є.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені математичні моделі і алгоритми розрахунку на стійкість багатопрогонних висотних конструкцій з урахуванням східчастої або неперервної зміни згинної жорсткості і поздовжньої сили по висоті, а також податливості пружних зв'язків секцій та конструкції з основою забезпечують суттєве підвищення точності визначення критичних осьових навантажень щогл та стріл підйимально-транспортних машин, веж бурових установок, опор ліній електропередач та установок вітрової енергетики тощо. Виконано приклади розрахунків на стійкість щогли будівельного підйимального пристрою та проведено дослідження впливу висоти споруди, числа і характеристик проміжних опор, а також локальних ослаблень на критичні навантаження. Досліджено особливості втрати стійкості А-подібної бурової вежі.

Одержані у дисертації результати математичного моделювання напружено-деформованого стану і аналізу стійкості багатопрогової конструкції магістрального трубопроводу з урахуванням дії температурних навантажень і особливостей взаємодії труби з пружною основою можуть бути використані під час проектування та реконструкції магістральних трубопроводів, що дасть можливість раціонально добирати число температурних компенсаторів та проміжних опор надземних ділянок. Методику експериментальних досліджень локальних ослаблень магістральних трубопроводів у зв'язку з макророзшаруванням матеріалу труби в про-

цесі тривалої експлуатації та результати досліджень стійкості трубопроводів доцільно застосовувати під час проведення технічної діагностики трубопроводів.

Результати наукових досліджень у вигляді математичних моделей і алгоритмів розрахунку багатопрогонових довгомірних конструкцій на стійкість, а також практичних рекомендацій щодо забезпечення стійкості зазначених конструкцій пройшли промислові випробування під час оцінки стійкості надземного переходу «Острогозьк – Шебелинка», П н. Ду 1220, Ру 5,5 МПа, км 165 Круп'янського ЛВУ МГ Філії УМГ «Харківтрансгаз». Розроблене математичне і програмне забезпечення для проведення аналізу стійкості багатопрогонових довгомірних конструкцій, що перебувають під дією статичних і динамічних навантажень використовуються в процесі викладання дисциплін «Математичні основи механіки підйомно-транспортних систем» при підготовці бакалаврів, а також дисципліни «Гнучкі автоматизовані системи дискретних виробництв» при підготовці магістрів за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» у Національному університеті «Львівська політехніка».

Особистий внесок здобувача. Основні результати, отримані під час розв'язання поставлених у дисертаційній роботі задач, отримані автором особисто. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, автору належать: математична модель і алгоритм аналізу напружено-деформованого стану багатопрогонової висотної конструкції змінної згинної жорсткості під час втрати стійкості і вільних поздовжньо-поперечних коливань [2]; математична модель напружено-деформованого стану, алгоритм і приклади розрахунків на стійкість щогли будівельного підйимального пристрою [3]; результати випробувань ослабленої зони трубопроводу, ультразвукового контролю товщини стінки труби, вибіркового металографічного аналізу та лабораторних досліджень механічних характеристик матеріалу [5, 6]; математична модель напружено-деформованого стану, алгоритм і результати розрахунку на стійкість висотної конструкції пілонного типу [7]; математична модель та результати дослідження поздовжньо-поперечного згину багатопрогонової висотної конструкції в умовах дії динамічного навантаження [9].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися і обговорювалися: на семінарах кафедри «Механіка та автоматизація машинобудування» (2012, 2014, 2015, 2016 рр.); на другій міжнародній науково-практичній конференції «Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій» (Львів-Дубляни, 2012 р.); на міжнародній науково-технічній конференції «Energia w pause i technice» (Bialystok-Kleosin, 2012 р.); на міжнародній науково-практичній конференції імені доктора технічних наук Сокола Е. М. (Львів, 2015 р.); на відкритій науково-технічній конференції молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України (Львів, 2015 р.); на 5-й Міжнародній науково-технічній конференції «Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій» (Львів, 2016 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 11 наукових праць, з них 5 статей у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у журналі, що належить до переліку наукових фахових видань України, а його переклад – до науко-

метричної бази Web of Science, 1 розділ монографії, опублікованої за кордоном, 1 стаття в українському журналі, який включено до міжнародних наукометричних баз даних, 3 праці у матеріалах конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота викладена на 172 сторінках, містить 122 сторінки основного тексту, список використаних джерел, який налічує 162 найменування, 31 рисунок, 26 таблиць і 3 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовано мету і задачі дослідження, подана загальна характеристика роботи.

Перший розділ дисертаційної роботи присвячено аналізу сучасного стану проблеми статичної і динамічної стійкості довгомірних інженерних конструкцій. Охарактеризовано застосування та особливості навантаження вказаних технічних об'єктів. Звернено увагу на те, що задачі стійкості і модального аналізу є близькими за змістом й за методами розв'язання. Тому нерідко їх розглядають у спільній постановці, розробляють єдині алгоритми розрахунку власних частот і критичних навантажень, а також власних форм коливань та статичного деформування.

Зазначено, що значний внесок у розвиток методів розрахунку довгомірних конструкцій на стійкість за дії як статичних так і динамічних навантажень зробили А. В. Алексанров, В. А. Баженов, І. А. Біргер, В. В. Болотін, В. З. Власов, А. С. Вольмір, В. І. Гуляєв, В. В. Гайдачук, Е. І. Григолюк, О. Ф. Дащенко, А. П. Зінковський, В. А. Кисельов, Л. Коллатц, Л. В. Коломієць, С. С. Кохманюк, Б. Я. Лащеніков, А. М. Масленіков, І. Ф. Образцов, В. Ф. Оробей, Я. Г. Пановко, А. Р. Ржаніцин, Л. А. Розін, А. Ф. Смірнов, В. А. Светлицький, Р. М. Тацій, С. П. Тимошенко, А. П. Філін, А. П. Філіппов, Л. Ф. Шевченко, Luis G. Arboleda-Monsalve, J. Dario Aristzabol-Ochta, F. Atkinson, P. K. Benerdgy, M. G. Chebl, S. H. Farchaly, W. Sochacki, J. Szmidza, J. F. Monsalve-Cano, David G. Zapato-Mediana.

Результати досліджень, спрямованих на забезпечення працездатності і зокрема, статичної і динамічної стійкості трубопроводів та буриньних колон висвітлені у працях А. Б. Айбіндера, Б. С. Білобрана, П. П. Бородавкіна, В. І. Векерика, П. А. Віслобіцького, С. В. Виноградова, В. І. Гуляєва, В. Я. Грудзя, І. В. Ориняка, С. А. Радченка, В. М. Мойсишина.

Під час досліджень багатопрогнозових довгомірних конструкцій на стійкість і коливання застосовують як технічну теорію згину, так і неklasичну теорію балок С. Тимошенка. Важливе місце відводиться вивченню поведінки як суцільних, так і локально ослаблених довгомірних конструкцій місцевими звуженнями поперечного перерізу, наявністю податливих з'єднань, а також дефектами матеріалу, що з'являються в процесі його старіння (корозія, тріщини, розшарування металу тощо). У найпростіших випадках розрахунки таких конструкцій виконують на основі застосування моделей зі скінченим числом ступенів вільності, у яких споруда розглядається як система твердих тіл, зв'язаних між собою за допомогою пружних шарнірів. Для підвищення точності розрахунків на стійкість побудовані контину-

ально-дискретні математичні моделі напружено-деформованого стану і коливань механічних систем. Розглядаються особливості визначення коефіцієнтів жорсткості ослаблених зон та проводяться експериментальні дослідження динамічної стійкості балок з тріщинами методом скінченних елементів. Досліджується вплив системи тріщин на коливання балки з урахуванням дії осьового навантаження.

Проведений аналіз досліджень у галузі коливань і стійкості довгомірних конструкцій засвідчує *актуальність* проблеми удосконалення інженерних методів розрахунку та обґрунтування заходів щодо забезпечення стійкості багатопрогонових механічних систем з комплексним урахуванням зміни параметрів поперечного перерізу по довжині, податливості опорних і з'єднувальних вузлів та локально ослаблених зон. У той же час, питання забезпечення стійкості багатопрогонових довгомірних конструкцій з урахуванням дії статичних і динамічних навантажень у науковій літературі висвітлені недостатньо, методи розрахунку згаданих конструкцій потребують подальшого розвитку і уточнення.

У **другому розділі** побудовано математичні моделі напружено-деформованого стану багатопрогонових висотних конструкцій щоглового типу з урахуванням східчастої або неперервної зміни згинної жорсткості і поздовжньої сили по довжині, а також податливості опор і з'єднувальних вузлів. Розглянуто особливості моделювання вільних коливань і втрати стійкості висотної споруди пілонного типу. Опрацьовано раціональні алгоритми числової реалізації математичних моделей на основі застосування матричного методу початкових параметрів.

Для дослідження стійкості висотної конструкції зі східчастою зміною згинної жорсткості і поздовжньої сили по довжині механічну систему багатопрогонової висотної конструкції подано на розрахунковій схемі (рис. 1) у вигляді вертикального складеного стрижня, що включає n ділянок довжинами l_1, l_2, \dots, l_n , погонними масами $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$, площами і осьовими моментами інерції поперечних перерізів A_1, A_2, \dots, A_n і I_1, I_2, \dots, I_n . Умовну густину матеріалу для кожної з ділянок позначено як $\rho_i = \mu_i/A_i$. На межах ділянок передбачено наявність кріпильних вузлів масами m_1, m_2, \dots, m_n і податливих зв'язків з основою, коефіцієнти жорсткості яких у поперечному напрямі становлять c_1, c_2, \dots, c_n , а в обертальному напрямі – $c_{\phi 1}, c_{\phi 2}, \dots, c_{\phi n}$. Прогини багатопрогонової висотної конструкції позначено як w_1, w_2, \dots, w_n ; поздовжні осі ділянок з початками у їхніх нижніх крайніх перерізах – як x_1, x_2, \dots, x_n ; P – статичне навантаження.

Диференціальні рівняння зігнутої осі багатопрогонової конструкції записано у вигляді

$$\frac{\partial^4 w_i}{\partial x_i^4} + b_i^2 \frac{\partial^2 w_i}{\partial x_i^2} = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

де

$$b_i^2 = \frac{P_i}{EI_i}.$$

Тут P_i – усереднена поздовжня сила у поперечному перерізі відповідної ділянки,

$$P_i = \left(\frac{\mu_i l_i}{2} + \sum_{j=i+1}^n \mu_j l_j + \sum_{j=i}^n m_j \right) g + P \quad (i = 1, 2, \dots, n-1);$$

$$P_n = \left(\frac{\mu_n l_n}{2} + m_n \right) g + P, \quad (2)$$

E – модуль Юнга матеріалу споруди.

Кут повороту поперечного перерізу, згинальний момент і внутрішню силу у горизонтальному перерізі конструкції визначено за формулами

$$\varphi_i = \frac{dw_i}{dx_i}; \quad M_i = -EI_i \frac{d^2 w_i}{dx_i^2}; \quad V_i = -EI_i \frac{d^3 w_i}{dx_i^3} - P_i \frac{dw_i}{dx_i}, \quad (i = 1, 2, \dots, n). \quad (3)$$

Поперечну силу, на відміну від внутрішньої сили у горизонтальному перерізі, визначено як

$$Q_i = -EI_i \frac{d^3 w_i}{dx_i^3}. \quad (4)$$

Крайові умови, яким повинні відповідати розв'язки диференціального рівняння (1) на нижньому кінці споруди, записано у вигляді

$$w_1(0) = 0; \quad \varphi_1(0) = 0. \quad (5)$$

Крайові умови для стиків сусідніх ділянок багатопрогової конструкції мають вигляд

$$w_{i+1}(0) = w_i(l_i); \quad \varphi_{i+1}(0) = \varphi_i(l_i);$$

$$M_{i+1}(0) = -c_{\varphi_i} \varphi_i(l_i) + M_i(l_i); \quad V_{i+1}(0) = c_i w_i(l_i) + V_i(l_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n-1). \quad (6)$$

Крайовими умовами для верхнього крайнього перерізу висотної споруди є:

$$-c_{\varphi_n} \varphi_n(l_n) + M_n(l_n) = 0; \quad c_n w_n(l_n) + V_n(l_n) = 0. \quad (7)$$

Залежності (1)–(7) становлять математичну модель для розрахунку на стійкість багатопрогової висотної конструкції, числа реалізація якої здійснюється із застосуванням методу початкових параметрів.

Для підтвердження результатів розглянуто розрахунки на стійкість щогли будівельного підйомного пристрою ZREMB-Gniezno-1000, призначеного для підймання кабіни масою 1200 кг з вантажем масою до 1000 кг на висоту до 150 м. Підймання вантажу здійснюється за допомогою електромеханічного приводу, розташованого у кабіні, та зубчастій передачі шестірня-рейка. Для зменшення енергії, що повинна витратитися на підймання вантажу, а також

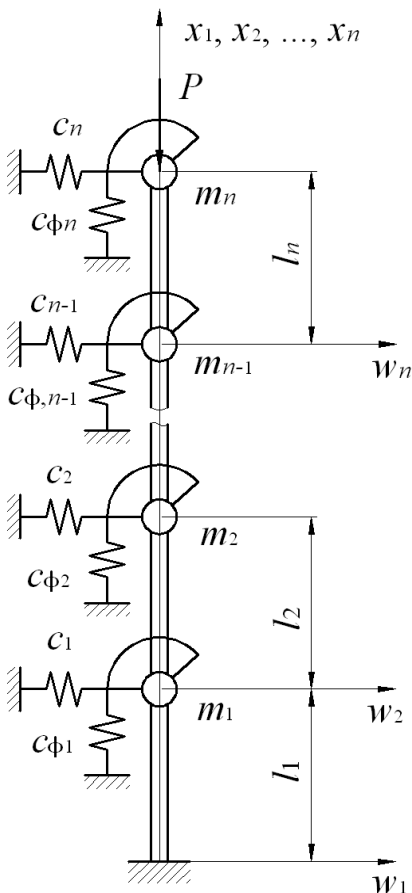


Рисунок 1 – Розрахункова схема багатопрогової висотної конструкції

зусиль, що виникають в елементах привідної системи, підймальний пристрій оснащений противагою масою 1000 кг, яка з'єднана з кабіною за допомогою каната, перекинутого через блоки, встановлені на верху щогли. Отже, номінальне осьове навантаження висотної конструкції становить 3200 кг.

Геометричні і жорсткісні параметри щогли: $l_1 = 12,00$ м; l_i ($i = 2, 3, \dots, n-1$) = $9,00$ м; $l_n = 3,00$ м; E_i ($i = 1, 2, \dots, n$) = $2,10 \cdot 10^{11}$ Н/м²; A_i ($i = 1, 2, \dots, n$) = $3,34 \cdot 10^{-3}$ м²; I_i ($i = 1, 2, \dots, n$) = $3,26 \cdot 10^{-4}$ м⁴; ρ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) = $1,25 \cdot 10^4$ кг/м³; μ_i ($i = 1, 2, \dots, n$) = $41,68$ кг/м; m_i ($i = 1, 2, \dots, n-1$) = $10,00$ кг; $m_n = 10,00$ кг; m_i ($i = 1, 2, \dots, n$) = $3,50 \cdot 10^6$ Н/м; $c_{\phi 1}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) = $2,50 \cdot 10^3$ Н·м/рад;

Результати визначення характеристик стійкості щогли висотою від 15 до 60 м показали, що із збільшенням висоти споруди істотно зростає її гнучкість і спадають розрахункові значення критичної сили і критичного напруження. Застосування бокових кріплень значно підвищує жорсткість конструкції, переводячи її з області великих в область середніх або малих гнучкостей. За відсутності таких кріплень критичне напруження може виявитися меншим, ніж напруження викликане номінальним навантаженням і силами власної ваги споруди. В процесі розв'язання задачі обчислено значення коефіцієнтів зведеної довжини багатопрогонової висотної конструкції з урахуванням числа, розташування та значень коефіцієнтів жорсткості проміжних опор. За наявності усіх бокових кріплень щогли, що передбачені її проектом, прогини і кути повороту поперечних перерізів нижньої і середньої частини щогли, згідно з основними формами деформування конструкції, є значно меншими від відповідних параметрів для верхньої частини щогли. Це свідчить про можливість збільшення критичного навантаження.

Третій розділ присвячений дослідженню стійкості трипрогонової конструкції магістрального трубопроводу, яка включає надземну і зв'язані з нею підземні ділянки і перебуває під дією температурних навантажень.

Побудована математична модель осьового деформування трубопроводу з урахуванням взаємодії надземної ділянки з підземними, а також підземних ділянок з ґрунтом. Розглянуто випадки деформування труби без проковзування та з проковзуванням відносно ґрунту. За відсутності проковзування розрахункова модель підземної ділянки подана на рис. 2, де переміщення деякого поперечного перерізу труби у напрямі осі Ox позначено як u ; навантаження підземної ділянки з боку надземної – як P ; поздовжні сили, що діють на нескінченно малий елемент довжиною dx , – як N та $N+dN$; сила, що діє на цей елемент з боку ґрунту – як dT .

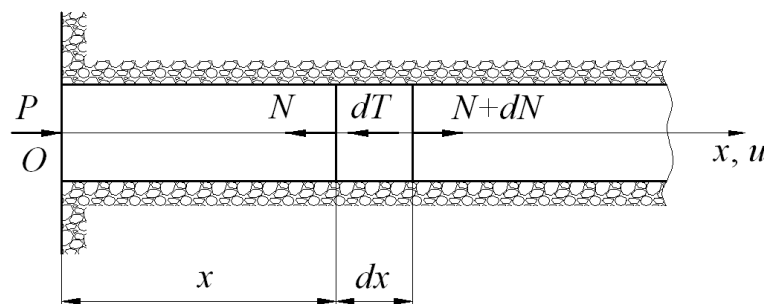


Рисунок 2 – Розрахункова схема підземної ділянки магістрального трубопроводу

Після розв'язання крайової задачі аналізу напружено-деформованого стану підземної дільниці і врахування умови сумісності деформацій одержано формулу для визначення поздовжньої сили в надземній дільниці,

$$N_2 = A\mu\sigma_{\text{кц}} - \frac{EA\alpha k}{kl_2 + 2} \left(l_2 \cdot \Delta t_{\text{н}} + \frac{2}{k} \Delta t_{\text{п}} \right) \quad (8)$$

та аналітичні залежності для знаходження переміщень і внутрішніх зусиль на підземній дільниці

$$u_{1,3} = \frac{1}{k} \left(-\frac{N_2}{EA} - \alpha \cdot \Delta t_{\text{п}} + \frac{\mu\sigma_{\text{кц}}}{E} \right) e^{-kx}; \quad (9)$$

$$N_{1,3} = - \left(-N_2 + EA\alpha \cdot \Delta t_{\text{п}} - A\mu\sigma_{\text{кц}} \right) e^{-kx} - EA\alpha \cdot \Delta t_{\text{п}} + A\mu\sigma_{\text{кц}}, \quad (10)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона матеріалу труби; α – коефіцієнт лінійного розширення матеріалу; l – довжина надземної дільниці; A – площа поперечного перерізу труби; $\Delta t_{\text{н}}$, $\Delta t_{\text{п}}$ – температурні перепади надземної і підземної дільниць, додатні у випадку нагрівання; $\sigma_{\text{кц}}$ – кільцеве напруження, обумовлене дією внутрішнього тиску; $k^2 = k_q/(EA)$, причому, k_q – коефіцієнт пропорційності між погонним зусиллям і переміщенням поперечного перерізу.

Встановлено межі застосування залежностей (8)–(10) у вигляді

$$-EA\alpha \cdot \Delta t_{\text{п}} + A\mu\sigma_{\text{кц}} - \frac{EAk\tau_{\text{гр}}}{k_{\tau}} \leq N_2 \leq -EA\alpha \cdot \Delta t_{\text{п}} + A\mu\sigma_{\text{кц}} + \frac{EAk\tau_{\text{гр}}}{k_{\tau}}, \quad (11)$$

де $\tau_{\text{гр}}$ – граничне напруження, що відповідає граничному переміщенню $u_{\text{гр}}$.

Якщо ж умова (11) не виконується, то підземні дільниці, внаслідок нагрівання надземної, деформуються з проковзуванням. Для цього випадку одержано вирази поздовжнього зусилля у надземній дільниці, а також вирази переміщень і внутрішніх зусиль у підземних дільницях,

$$N_2 = A\mu\sigma_{\text{кц}} - \frac{EAk}{l_2k + 2a_1k + 2} \left\{ \alpha \left[l_2\Delta t_{\text{н}} + \left(2a_1 + \frac{2}{k} \right) \Delta t_{\text{п}} \right] + \left(a_1 + \frac{2}{k} \right) sa_1 \right\}; \quad (12)$$

$$u_{1,3}(x) = \frac{sx^2}{2} + \left(\frac{N_2}{EA} + \alpha \cdot \Delta t_{\text{п}} - \frac{\mu\sigma_{\text{кц}}}{E} \right) x -$$

$$- \left(a_1 + \frac{1}{k} \right) \cdot \left(\frac{N_2}{EA} + \alpha \cdot \Delta t_{\text{п}} - \frac{\mu\sigma_{\text{кц}}}{E} \right) - \left(\frac{a_1}{2} + \frac{1}{k} \right) sa_1, \quad \text{якщо } 0 \leq x \leq a_1; \quad (13)$$

$$u_{1,3}(x) = -\frac{1}{k} \left(\frac{N_2}{EA} + \alpha \cdot \Delta t_{\text{п}} - \frac{\mu\sigma_{\text{кц}}}{E} + sa_1 \right) e^{-k(x-a_1)}, \quad \text{якщо } x > a_1; \quad (14)$$

$$N_{1,3}(x) = N_2 + EA sx, \quad \text{якщо } 0 \leq x \leq a_1; \quad (15)$$

$$N_{1,3}(x) = EA \left(\frac{N_2}{EA} + \alpha \cdot \Delta t_{\text{п}} - \frac{\mu \sigma_{\text{кц}}}{E} + s a_1 \right) e^{-k(x-a_1)} - EA \alpha \cdot \Delta t_{\text{п}} + A \mu \sigma_{\text{кц}},$$

якщо $x > a_1$, (16)

де $s = q_{\text{гр}}/(EA)$, причому, $q_{\text{гр}} = \pi D \tau_{\text{гр}}$ (D – зовнішній діаметр труби); a_1 – довжина відрізка підземної ділянки трубопроводу, який деформується з проковзуванням відносно ґрунту,

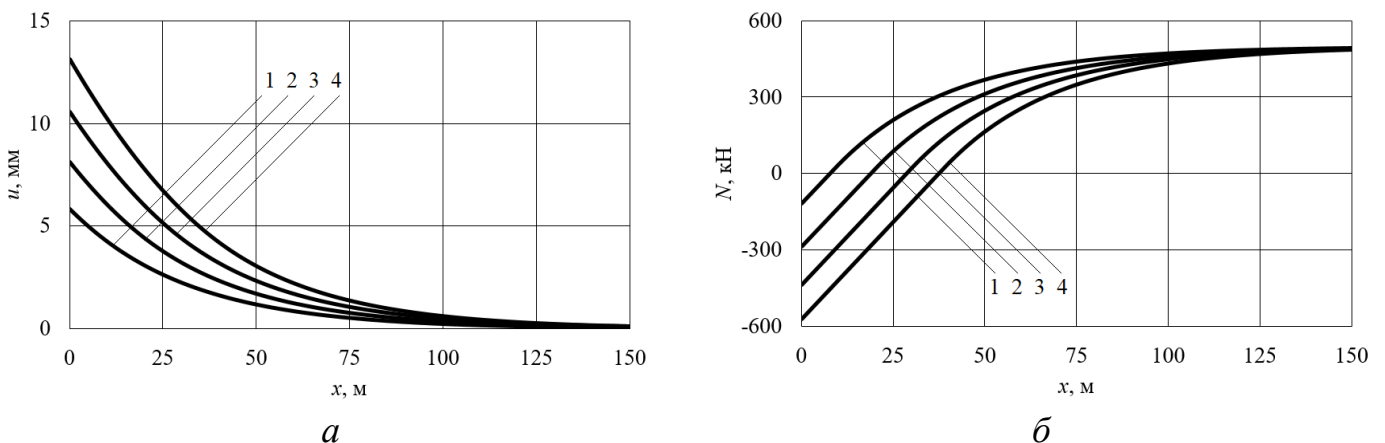
$$a_1 = -\frac{b}{2} + \sqrt{\frac{b^2}{4} - c},$$
(17)

тут

$$b = l_2 + \frac{2k\tau_{\text{гр}}}{k_{\tau}s}; \quad c = \frac{\tau_{\text{гр}}}{k_{\tau}s} (kl_2 + 2) - \frac{\alpha l_2}{s} (\Delta t_{\text{н}} - \Delta t_{\text{п}}).$$
(18)

Із застосуванням залежностей (8)–(18) побудовано загальний алгоритм переміщень і внутрішніх зусиль для надземної і підземних ділянок трубопроводу.

На розрахункових прикладах показано, що із збільшенням довжини і перепаду температури надземної ділянки магістрального трубопроводу абсолютна величина зусилля стиску цієї ділянки, а також довжина відрізка підземної ділянки, на якому труба деформується з проковзуванням відносно ґрунту, значно зростають. Із збільшенням внутрішнього тиску в трубі абсолютна величина зусилля стиску надземної ділянки зменшується. Довжина відрізка підземної ділянки, на якому труба деформується з проковзуванням, від тиску газу в трубі не залежить. З огляду на можливу втрату стійкості, найнебезпечнішим випадком навантаження надземної ділянки трубопроводу слід вважати випадок стискання незаповненої газом труби за максимального температурного перепаду. Результати розрахунку параметрів напружено-деформованого стану підземної ділянки трубопроводу наведені на рис. 3.



1 – $\Delta t_{\text{н}} = 30^\circ$; 2 – $\Delta t_{\text{н}} = 40^\circ$; 3 – $\Delta t_{\text{н}} = 50^\circ$; 4 – $\Delta t_{\text{н}} = 60^\circ$

Рисунок 3 – Залежності осьових переміщень (*a*), і поздовжнього зусилля (*б*) від координати поперечного перерізу підземної ділянки трубопроводу

До важливих чинників, що впливають на стійкість надземних ділянок магістральних трубопроводів відносяться локальні ослаблення труб, що можуть бути обумовлені розвитком дефектів у матеріалах трубопроводів в процесі експлуатації. У роботі розглядаються результати досліджень обширного воднем ініційованого розшарування у стінці зігнутої частини тривало експлуатованої відвідної від газокompресорної станції труби в системі магістральних газопроводів. Проаналізовано чинники, що відіграли вирішальну роль у його утворенні. Встановлено, що його діагностичними ознаками є аномальні покази товщиноміра, різке зниження твердості та пластичності сталі. Виявлено вищий ступінь деградації сталі зігнутої частини труби порівняно з її прямою ділянкою, причому незалежно від того, ділянка розтягнута чи стиснута. Як показали обчислення, розшарування металу труби може призвести до істотного зменшення моменту інерції поперечного перерізу труби, що свідчить про істотний вплив розшарування на згинну жорсткість локальних ослаблених зон магістральних трубопроводів.

Із застосуванням технічної теорії згину побудовано математичну модель втрати стійкості трипрогонової конструкції магістрального трубопроводу, яка включає надземну і зв'язані з нею підземні ділянки (рис. 4). Прийнято, що прогони, які знаходяться у землі, мають скінченну довжину і опираються на основу типу Вінклера. Довжини прогонів довгомірної конструкції позначено як l_i ($i = 1, 2, 3$), а погонні коефіцієнти постелі – як k_1, k_3 . Для опису напружено-деформованого стану трубопроводу використовуємо поздовжні координатами x_i ($i = 1, 2, 3$) з початками у лівих крайніх перерізах відповідних прогонів, направлених праворуч. Прогини здеформованої осі довгомірної конструкції позначаємо як w_i ($i = 1, 2, 3$).

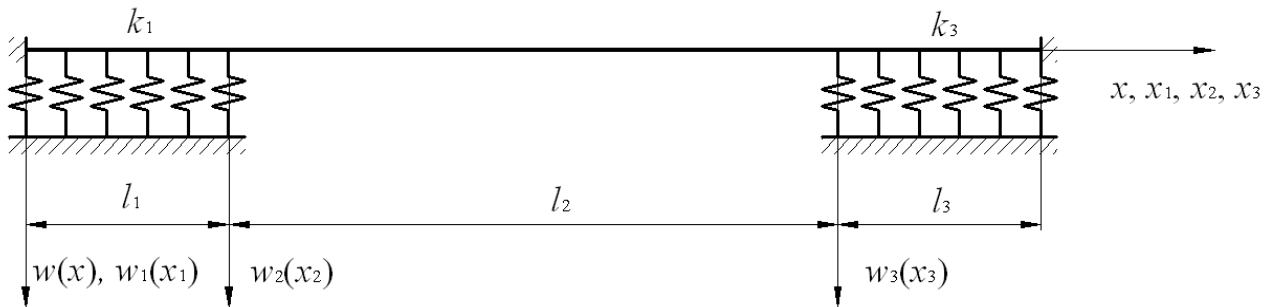


Рисунок 4 – Розрахункова схема надземної ділянки трубопроводу з частинами підземних ділянок

Для зручності зображення форм коливань усієї трипрогонової конструкції додатково вводимо направлену вправо, спільну для усіх ділянок координату x з початком на лівому кінці конструкції.

Рівняння напружено-деформованого стану прогонів, опертих на пружну основу записуємо у вигляді

$$\frac{d^4 w_i}{dx_i^4} + b_i^2 \frac{d^2 w_i}{dx_i^2} + c_i^4 w_i = 0 \quad (i = 1, 3); \quad (19)$$

де

$$b_i = \frac{P_i}{EI_i}; \quad c_i = \frac{k_i}{EI_i}, \quad (20)$$

причому I_i – осьовий момент інерції поперечного перерізу труби; P_i – осьова сила, якою стискається надземна ділянка труби.

Диференціальні рівняння зігнутої осі другого прогону трубопроводу запишемо у вигляді

$$\frac{d^4 w_2}{dx_2^4} + b_2^2 \frac{d^2 w_2}{dx_2^2} = 0, \quad (21)$$

де

$$b_2^2 = \frac{P_2}{EI_2}. \quad (22)$$

Кут повороту поперечного перерізу, згинальний момент і внутрішню силу у вертикальному перерізі конструкції визначаємо за формулами

$$\begin{aligned} \varphi_i &= \frac{dw_i}{dx_i}; & M_i &= -EI_i \frac{d^2 w_i}{dx_i^2}; \\ V_i &= -EI_i \frac{d^3 w_i}{dx_i^3} - P_i \frac{dw_i}{dx_i} \quad (i = 1, 2, 3). \end{aligned} \quad (23)$$

Поперечну силу, на відміну від внутрішньої сили у вертикальному перерізі, знаходимо як

$$Q_i = -EI_i \frac{d^3 w_i}{dx_i^3}. \quad (24)$$

Крайові умови, яким повинні відповідати розв'язки диференціального рівняння (19), (21) на лівому кінці споруди, у стиках сусідніх прогонів та у крайньому правому поперечному перерізі записуємо у вигляді

$$w_1(0) = 0; \quad \varphi_1(0) = 0; \quad (25)$$

$$w_{i+1}(0) = w_i(l_i); \quad \varphi_{i+1}(0) = \varphi_i(l_i) - \frac{M_i(l_i)}{c_i};$$

$$M_{i+1}(0) = M_i(l_i); \quad V_{i+1}(0) = V_i(l_i) \quad (i = 1, 2); \quad (26)$$

$$w_3(l_3) = 0; \quad \varphi_3(l_3) = 0, \quad (27)$$

де c_1, c_2 – коефіцієнти жорсткості ослаблених зон труби.

Співвідношення (19)–(27) утворюють математичну модель втрати стійкості трипрогонувої конструкції магістрального трубопроводу. Розрахунки на стійкість з визначенням температурних зусиль і напружень на надземній ділянці, а також гнучкості, коефіцієнта зведеної довжини і критичної сили проводили для трубопроводу без локальних ослаблень та з одним або двома (на межах сусідніх ділянок) ослабленнями. Вихідні дані для проведення розрахунків були прийняті: зовнішній діаметр труби $D = 529$ мм; товщина стінки $\delta = 10$ мм; довжина підземних ділянок $l_1 = l_3 = 20$ мм; довжину надземної ділянки l_2 змінювали в межах від 20

до 80 м; модуль пружності першого роду, густина і коефіцієнт Пуассона матеріалу труби $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа; $\rho = 0,787$ кг/м³; $\mu = 0,3$; коефіцієнт пропорциональності між осьовим переміщенням поперечного перерізу підземного прогону труби і дотичними напруженням на її зовнішній поверхні $k_\tau = 2,0 \cdot 10^6$ Н/м³; погонний коефіцієнт постелі пружної основи, на яку опираються крайні прогони, $k = 2,5 \cdot 10^7$ Н/м². Розглядали найбільш несприятливий випадок, коли внутрішній тиск газу у трубі відсутній. Вважали, що труба перебуває під дією осьового навантаження, викликаного температурним перепадом надземної ділянки $\Delta t_n = 50^\circ$. Можливе проковзування труби відносно ґрунту, яке зменшує поздовжнє зусилля стиску труби, до уваги не брали. Коефіцієнти жорсткості пружних шарнірів, якими моделювали ослаблені зони трубопроводу, прийнято рівними $1,1533$ Н·м/рад, що рівнозначно зменшенню осьового моменту інерції вдвічі на відрізку труби довжиною 1 м.

Одержані результати розрахунків (рис. 5) засвідчують, що в реальних умовах експлуатації магістральних трубопроводів температурні перепади можуть призводити до втрати статичної стійкості надземних ділянок. Зростання довжини надземної ділянки трубопроводу, а також податливість локально ослаблених зон помітно збільшує гнучкість і коефіцієнт зведеної довжини пружної механічної системи та істотно зменшує критичне навантаження, що необхідно враховувати під час проектування магістральних трубопроводів.

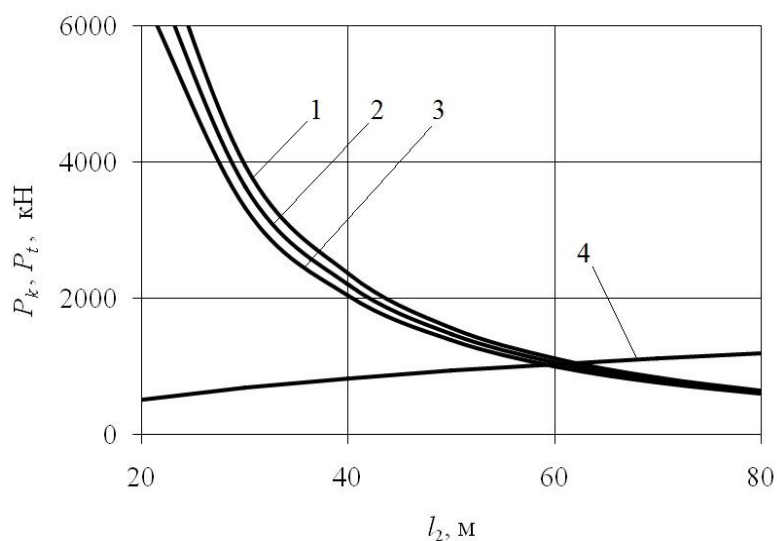


Рисунок 5 – Залежності критичного навантаження трипрогонової конструкції трубопроводу без локальних ослаблень (1), з одним (2) і двома (3) локальними ослабленнями та залежність температурного зусилля в трубі (4) від довжини надземного прогону

У четвертому розділі розглянуто параметричні згинні коливання багатопрогонової висотної конструкції, защемленої в основі і додатково закріпленої за допомогою відтяжок. Споруда навантажена осьовою силою, що має постійну складову і складову, яка змінюється за періодичним законом. Розв'язки рівнянь руху механічної системи відшукуються у вигляді розкладу за власними формами коливань. Розрахунок динамічної стійкості зводиться до аналізу рівняння Мат'є.

Розглянуто параметричні згинні коливання багатопрогонової висотної конструкції, зображеної на рис. 1, у її головній площині. Прийняті позначення: l_1, l_2, \dots, l_n – довжини прогонів; c_i, v_i ($i=1, 2, \dots, n+1$) – коефіцієнти жорсткості і коефіцієнти в'язкого тертя пружних опор у горизонтальному напрямі; P – осьове навантаження; x_i ($i=1, 2, \dots, n$) – поздовжні координати перерізів прогонів з початками на нижніх кінцях прогонів; w_i ($i=1, 2, \dots, n$) – прогини відповідних прогонів.

Осьове навантаження конструкції задаємо у вигляді

$$P = P_0 + P_t \cdot T(t), \quad (28)$$

де P_0 – статична складова навантаження; P_t – амплітуда динамічної складової навантаження; $T(t)$ – періодична функція часу.

Рівняння параметричних коливань ділянок споруди записуємо у вигляді

$$EI_i \frac{\partial^4 w_i}{\partial x_i^4} + [P_0 + P_t T(t)] \frac{\partial^2 w_i}{\partial x_i^2} + A_i \rho \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (29)$$

де E і ρ – модуль пружності першого роду і густина матеріалу конструкції; A_i, I_i – площі і осьові моменти інерції поперечних перерізів прогонів.

Розв'язки рівнянь з частинними похідними відшукуємо у вигляді

$$w_i(x_i, t) = \sum_{j=1}^{\infty} W_{ij}(x_i) \tau_j(t), \quad (30)$$

де $W_{ij}(x_i)$ – власні форми коливань прогонів споруди (j – порядковий номер власної форми), $\tau_j(t)$ – періодична функція часу.

Для визначення власних частот і форм коливань висотної конструкції запишемо рівняння її вільних коливань у вигляді

$$EI_i \frac{\partial^4 w_i}{\partial x_i^4} + A_i \rho \frac{\partial^2 w_i}{\partial t^2} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (31)$$

Відшукуємо розв'язки рівнянь у вигляді

$$w_i(x_i, t) = W_i(x_i) \cos \omega t \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (32)$$

де ω – власна частота.

Підставляючи вираз (32) до рівності (31) і розділяючи змінні, одержуємо рівняння амплітудних функцій

$$\frac{d^4 W_i(x_i)}{dx_i^4} - \lambda_i^4 W_i(x_i) = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (33)$$

де

$$\lambda_i^4 = \frac{A_i \rho \omega^2}{EI_i}.$$

Оскільки амплітудні функції, що описують форми вільних і параметричних коливань, а також форми прогинів конструкції в процесі втрати статичної стійкості є близькими між собою, їх ототожнюємо.

Це дає можливість виразити другу і четверту похідні прогину конструкції через саму функцію прогину з диференціальних залежностей (33) і (34):

$$\frac{d^2 W_i(x_i)}{dx_i^2} = -\frac{A_i \rho \omega^2}{P_k} W_i(x_i);$$

$$\frac{d^4 W_i(x_i)}{dx_i^4} = \frac{A_i \rho \omega^2}{EI_i} W_i(x_i) \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (34)$$

Для окремо взятої форми параметричних коливань конструкції рівняння (29) з урахуванням залежності (30) зводимо до вигляду

$$EI_i \frac{d^4 W_i(x_i)}{dx_i^4} \tau + [P_0 + P_t T(t)] \frac{d^2 W_i(x_i)}{dx_i^2} \tau + A_i \rho W_i(x_i) \ddot{\tau} = 0 \quad (i=1, 2, \dots, n). \quad (35)$$

Підставляючи у рівняння (35) вирази другої і четвертої похідних амплітудних функцій, одержуємо

$$\ddot{\tau} + \omega^2 \left[1 - \frac{P_0 + P_t T(t)}{P_k} \right] \tau = 0. \quad (36)$$

Для стержня з довільним закріпленням кінців, стиснутого осьюовою силою P_0 , можна записати диференціальне рівняння (36) у вигляді

$$\ddot{\tau} + \lambda^2 \left[1 - \frac{P_t}{P_k - P_0} T(t) \right] \tau = 0. \quad (37)$$

де

$$\lambda = \omega \sqrt{1 - \frac{P_0}{P_k}}.$$

Перетворимо рівняння (37), до вигляду

$$\ddot{\tau} + \lambda^2 [1 - 2\mu T(t)] \tau = 0, \quad (38)$$

де

$$\mu = \frac{1}{2} \frac{P_t}{P_k - P_0}.$$

Диференціальне рівняння (38) є рівнянням Хілла, яке у випадку гармонічного збудження коливань

$$T(t) = \cos \omega t$$

перетворюється у рівняння Матьє

$$\ddot{\tau} + \lambda^2 (1 - 2\mu \cos \omega t) \tau = 0. \quad (39)$$

Істотною особливістю цього рівняння є те, що за певних співвідношень між його коефіцієнтами розв'язок рівняння зростає до безмежності. Такі розв'язки утворюють певні області на площині коефіцієнтів, які відповідають динамічній нестійкості.

ВИСНОВКИ

1. У дисертаційній роботі розроблено математичну модель напружено-деформованого стану і алгоритм розрахунку на стійкість багатопрогонової висотної конструкції з урахуванням східчастої зміни згинної жорсткості і осевого навантаження по висоті, а також податливості опор. Показано, що раціональне застосування додаткових зв'язків з основою є ефективним способом збільшення критичного навантаження та підвищення ефективності експлуатації щогли підйимального пристрою. За рахунок застосування додаткових опор можна досягти збільшення критичного навантаження щоглової конструкції більше, ніж на порядок. Податливість з'єднань секцій споруди може знижувати значення критичної сили на 12–15%.

2. Побудовано математичну модель напружено-деформованого стану багатопрогонової висотної конструкції на стійкість з урахуванням неперервної зміни згинної жорсткості і поздовжньої сили по висоті, а також податливості опор і з'єднувальних вузлів та опрацьовано узагальнений алгоритм розрахунку споруди на стійкість і колювання шляхом чисельного розв'язання рівнянь напружено-деформованого стану і систематизації обчислювального процесу за допомогою методу початкових параметрів. З'ясовано, що за рахунок урахування неперервної зміни параметрів висотної споруди можна досягти підвищення точності визначення критичної сили на 17–22%.

3. Розроблено математичну модель напружено-деформованого стану для аналізу статичної стійкості і вільних коливань складеної багатопрогонової висотної конструкції пілонного типу, та досліджено особливості втрати стійкості А-подібної бурової вежі. Підтверджена необхідність детального врахування структури і жорсткісних параметрів пілонної конструкції під час визначення критичних навантажень і проведення модального аналізу.

4. Побудовано математичну модель напружено-деформованого стану трипрогонової конструкції магістрального трубопроводу, що включає надземну і прилеглі до неї підземні ділянки і перебуває під дією температурних навантажень, та визначено поздовжні зусилля, переміщення і деформації труби на надземній та на підземних ділянках. Показано, що із збільшенням довжини і перепаду температури надземної ділянки абсолютна величина зусилля її стиску, а також довжина зони проковзування труби відносно ґрунту, значно зростають. З огляду на можливу втрату стійкості, найнебезпечнішим випадком навантаження надземної ділянки трубопроводу слід вважати стискання незаповненої газом труби за максимального температурного перепаду.

5. Проведений аналіз особливостей локального ослаблення магістрального трубопроводу у зв'язку з макророзшаруванням матеріалу труби показав, що сорокарічна експлуатація системи магістральних газопроводів призвела до інтенсивної деградації металу труб, в першу чергу, за його пластичністю. За зниження пластичності до критичного рівня під час тривалої сумісної дії робочих навантажень та абсорбованого металом водню з боку внутрішньої поверхні труби створюються умови для розвитку розшарування великої площі. Виявлені локалізація розшарування по товщині стінки ближче до зовнішньої поверхні

труби, а також вихід розшарування на зовнішню поверхню, що свідчить про можливість значного місцевого ослаблення трубопроводу.

6. Побудовано математичну модель і алгоритм розрахунку на стійкість багатопрогонової дільниці магістрального трубопроводу з урахуванням дії температурних навантажень і взаємодії труби з пружною основою. Як засвідчили результати розрахунків, температурні перепади, які реально виникають під час експлуатації трубопроводів, можуть призводити до втрати стійкості труби. З'ясовано, що локальні ослаблення трубопроводів можуть знижувати критичні навантаження на 15-25%. Одержані результати можуть бути використані під час проектування та реконструкції магістральних трубопроводів з метою обґрунтування раціонального числа температурних компенсаторів та проміжних опор надземних дільниць.

7. Запропоновано методологію розрахунку на динамічну стійкість багатопрогонових довгомірних конструкцій, що перебувають під дією періодичних осьових навантажень, на основі застосування континуально-дискретних розрахункових моделей та зведення задачі про поперечні коливання конструкції до аналізу розв'язків диференціального рівняння Матьє.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. *Кунта О. Є.* Розрахунок динамічної стійкості багатопрогонової висотної конструкції / О. Є. Кунта // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів: збірник наукових праць. – 2015. – № 780. – С. 58–63.

2. *Кузьо І. В.* Поздовжньо-поперечні коливання висотної споруди змінного перерізу / І. В. Кузьо, Є. В. Харченко, О. Є. Кунта // Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій: Збірник наукових праць. – Львів: Каменяр. – 2012. – Вип. 9. – С. 27–42.

3. *Кузьо І. В.* Розрахунок багатопрогонової висотної конструкції на стійкість / І. В. Кузьо, О. Є. Кунта // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Динаміка, міцність та проектування машин і приладів: збірник наукових праць. – 2016. – № 838. – С. 49–56.

4. *Кунта О. Є.* Розрахунок на стійкість багатопрогонової висотної конструкції з локальними послабленнями / О. Є. Кунта // Науковий вісник НЛТУ України: Збірник науково-технічних праць. – Львів: РВВ НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.4. – С. 372–381.

5. *Звірко О. І.* Діагностичні ознаки розшарування в стінці відвідних від компресорної станції труб газотранспортної системи / О. І. Звірко, С. Ф. Савула, О. Є. Кунта, О. Т. Цирульник // Нафтогазова енергетика. – 2016. – №1 (25). – С. 38–43.

6. *Харченко Л. Є.* Діагностика водневого макророзшарування в стінці гину труби системи магістральних газопроводів / Л. Є. Харченко, О. Є. Кунта, О. І. Звірко, Р. С. Савула, З. А. Дурягіна // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2015. – Т. 51. – № 4. – С. 84–90.

Kharchenko L. Ye. Diagnostics of Hydrogen Macrodelaamination in the Wall of a Bent Pipe in the System of Gas Mains / L. Ye. Kharchenko, O. Ye. Kunta,

O. I. Zvirko, R. S. Savula, Z. A. Duryahina // Materials Science. – January 2016. – Vol. 51. – Issue 4. – P. 530–537.

7. *Kuzio I. Oscillations modeling of mast A-shaped constructions of the drilling rigs in columns plane / I. Kuzio, Y. Kharchenko, O. Kunta // Energia w nauce i technice 2012: Oficyna Wydawnicza Politechniki Bialostockiej. – 2012. – S. 117–132.*

8. *Кунта О. Стійкість локально ослабленої надземної ділянки магістрального трубопроводу / О. Кунта // Технічні вісті: Науковий часопис. – 2016. – 1(43), 2(44). – С. 98–101.*

9. *Кузьо І. В. Динамічна стійкість висотної конструкції в умовах дії гармонічних навантажень / І. В. Кузьо, О. Є. Кунта // Безпека руху і наукові засади експертних досліджень транспортних пригод та інженерних споруд: Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції імені доктора технічних наук Сокола Едуарда Миколайовича. – Львів: ЛФ ДНУЗТ. – 2015. – С. 68–69.*

10. *Кунта О. Є. Вільні коливання і статична стійкість локально ослаблених щоглових конструкцій / О. Є. Кунта // Проблеми корозійно-механічного руйнування, інженерія поверхні, діагностичні системи: матеріали конференції КМН – 2015. Відкрита науково-технічна конференція молодих науковців і спеціалістів Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка НАН України. – Львів: Видавництво «БОНА». – 2015. – С. 49–50.*

11. *Кунта О. Дослідження стійкості надземної ділянки магістрального трубопроводу з локальними ослабленнями / О. Кунта // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій: Матеріали конференції. – Львів: КІНПАТРІ ЛТД. – 2016. – С. 32–34.*

АНОТАЦІЯ

Кунта О. Є. Забезпечення стійкості багатопрогонних довгомірних конструкцій з урахуванням дії статичних і динамічних навантажень. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.09 – динаміка та міцність машин. Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2017.

Дисертація присвячена удосконаленню методології розрахунку багатопрогонних довгомірних конструкцій на стійкість за рахунок розроблення узагальнених математичних моделей аналізу напружено-деформованого стану з урахуванням ступінчастої або неперервної зміни згинної жорсткості і поздовжньої сили по довжині, податливості опор і з'єднувальних вузлів, а також дії статичних і динамічних навантажень.

Побудовані математичні моделі для розрахунку на стійкість висотних конструкцій у вигляді багатопрогонних брусів сталого та змінного поперечного перерізу, а також пілонної висотної конструкції бурової вежі. У зв'язку з однотипністю задач про стійкість і вільні коливання математичні моделі поширено на випадки модального аналізу висотних конструкцій. Розглянуто напружено-деформований стан і втрату стійкості трипрогонної конструкції магістрального трубопроводу, яка включає надземну і зв'язані з нею підземні ділянки і перебуває під дією температурних навантажень. Побудовано математичну модель багатопрогонної

висотної конструкції для її розрахунку на динамічну стійкість шляхом зведення рівнянь руху до системи диференціальних рівнянь Матьє.

Ключові слова: багатпрогонова довгомірна конструкція, статичні і динамічні навантаження, статична і динамічна стійкість.

АННОТАЦІЯ

Кунта О. Е. Обеспечение устойчивости многопролётных длинномерных конструкций с учетом действия статических и динамических нагрузок. – Рукопись.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.02.09 – динамика и прочность машин. – Национальный университет «Львовская политехника», Львов, 2017.

Диссертация посвящена совершенствованию методологии расчёта многопролётных длинномерных конструкций на устойчивость за счёт разработки обобщённых математических моделей анализа напряжённо-деформируемого состояния с учётом ступенчатого или непрерывного изменения изгибной жёсткости и продольного усилия по длине, податливости опор и соединительных узлов, а также действия статических и динамических нагрузок.

Достижение поставленной цели включало решение таких задач:

- разработка математической модели анализа напряженно-деформированного состояния многопролётной высотной конструкции в процессе потери статической устойчивости с учётом ступенчатого изменения изгибной жёсткости и продольной силы по высоте, а также податливости опор и соединительных узлов и обработки рационального алгоритма числовой реализации математической модели;

- построение и числовая реализация математической модели анализа напряженно-деформированного состояния и расчета многопролётных высотной конструкции на устойчивость и свободные колебания с учётом непрерывного изменения изгибной жёсткости и продольной силы по высоте, а также податливости опор и соединительных узлов

- разработка математической модели анализа напряженно-деформированного состояния, статической устойчивости и свободных колебаний составленной многопролётной высотной конструкции пилонного типа и проведение исследований особенностей потери устойчивости А-образной буровой вышки;

- построение математической модели напряженно-деформированного состояния трехпрогонных конструкции магистрального трубопровода, включая надземную и прилегающие к ней подземные участки и находится под действием температурных нагрузок и определения продольных усилий, перемещений и деформации трубы на надземных и на подземных участках;

- построение математической модели и алгоритма расчета на устойчивость многопролётного участка магистрального трубопровода с учетом действия температурных нагрузок и взаимодействия трубы с упругой основой и проведения исследований устойчивости надземного участка магистрального трубопровода;

– проведения экспериментальных исследований особенностей локального ослабления надземного участка магистрального трубопровода в связи с макро-расслоением материала трубы в процессе длительной эксплуатации и исследования влияния локального ослабления на устойчивость трубопровода;

– разработка метода исследования продольно-поперечного сгиба многопролётных высотной конструкции в условиях действия периодического осевой нагрузки, согласно которому расчёт сооружения на динамическую устойчивость сведено к решению системы дифференциальных уравнений Матье.

В диссертационной работе получила дальнейшее развитие методология расчёта многопролётных высотных конструкций на устойчивость за счёт разработки обобщенных математических моделей анализа напряженно-деформированного состояния с применением в качестве технической теории изгиба, так и неклассической теории балок С. Тимошенко и с учётом изменения сгибательной жесткости и продольной силы по длине, а также податливости упругих связей секций и конструкции с основанием.

Усовершенствован метод расчёта на устойчивость многопролётных длинномерных конструкций, находящихся под действием температурных нагрузок и включают прогоны, установленные на упругом основании. На примере надземного участка магистрального трубопровода впервые оценено совместное влияние температурных напряжений, взаимодействия подземных пролетов трубопровода с упругой основой, а также локальных ослаблений трубы на устойчивость длинномерной конструкции.

Впервые предложена методология расчёта на динамическую устойчивость многопролётных длинномерных конструкций, находящихся под действием периодических осевых нагрузок на основе применения континуально-дискретных расчётных моделей и сведения задачи о поперечных колебаниях конструкции к решению системы дифференциальных уравнений Матье.

Разработанные математические модели и алгоритмы расчёта на устойчивость многопролётных высотных конструкций с учётом ступенчатой или непрерывного изменения сгибательной жесткости и продольной силы по высоте, а также податливости упругих связей секций и конструкции с основанием обеспечивают существенное повышение точности определения критических осевых нагрузок мачт и стрел подъемно-транспортных машин, башен буровых установок, опор линий электропередач и установок ветровой энергетики. Выполнены примеры расчетов на устойчивость мачты строительного подъемного устройства и проведено исследование влияния высоты сооружения, числа и характеристик промежуточных опор, а также локальных ослаблений на критические нагрузки. Исследованы особенности потери устойчивости А-образной буровой вышки.

Полученные в диссертации результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния и анализа устойчивости многопролётных конструкции магистрального трубопровода с учётом действия температурных нагрузок и особенностей взаимодействия трубы с упругой основой могут быть использованы при проектировании новых и реконструкции существующих магистральных трубопроводов, что позволит рационально под-

бирать число температурных компенсаторов и промежуточных опор надземных участков. Методика экспериментальных исследований особенностей локального ослабления магистрального трубопровода в связи с макророзшариванием материала трубы в процессе длительной эксплуатации и результаты исследований влияния локального ослабления на устойчивость трубопровода целесообразно применять при проведении диагностики технического состояния магистральных трубопроводов.

Результаты научных исследований в виде математических моделей и алгоритмов расчёта многопролетных длиномерных конструкций на устойчивость, а также практических рекомендаций по обеспечению устойчивости указанных конструкций прошли промышленные испытания и используются в учебном процессе в Национальном университете «Львовская политехника».

Ключевые слова: *многопролётная длиномерная конструкция, статические и динамические нагрузки, статическая и динамическая устойчивость.*

ANNOTATION

Kunta O. Ye. Ensuring the sustainability of multisectional long constructions taking into account of static and dynamic loads. – A manuscript.

Dissertation for obtaining a scientific degree of a Candidate of Technical Sciences in specialty 05.02.09 – Dynamics and strength of machines. – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2017.

The thesis is devoted to improving of the methodology for calculation of multisectional long constructions for stability by developing generalized mathematical models for analysis of stress-strain state based on stepwise or continuous change of bending stiffness and longitudinal strength by the length, compliance of supports and connecting nodes, as well as static and dynamic loads.

A mathematical models were created for calculating of the stability of high-rise constructions in the form of multisectional bars of constant and variable cross-section and high-rise construction of drilling tower. Mathematical models were extended to the cases of modal analysis of high-rise constructions due to the common problems of stability and free vibrations. Considered the stress-strain state and loss of stability of triplisectioned construction of the pipeline, which includes aboveground and the related underground sections and is under temperature stress. The mathematical model multisectional high-rise construction was created for calculation of dynamic stability by reducing the equations of motion to a system of differential Mathieu equations.

Keywords: *multisectional long construction, static and dynamic loads, static and dynamic stability.*