

Дисертація є рукопис.
Робота виконана в Придніпровській державній академії
будівництва та архітектури (ПДАБА) Міністерства освіти України

Науковий консультант:

Заслужений діяч науки і техніки
України, доктор технічних наук,
професор Швець Віктор Борисович,
ПДАБА, завідуючий кафедрою
"Основи і фундаменти".

Офіційні опоненти:

- доктор технічних наук, професор Ставніцер Леонід Рувимович,
НДІОБВ (м. Москва), завідуючий лабораторією динаміки ґрунтів;
- доктор технічних наук, професор Петраков Олександр Олександрович,
Донецька академія будівництва і архітектури, завідуючий
кафедрою залізобетонних конструкцій, підвалин і фундаментів;
- доктор технічних наук, професор Почтман Юрій Михайлович,
Дніпропетровський державний університет, професор кафедри
обчислювальної механіки і міцності конструкцій.

Провідна установа :

Державний науково-дослідний інститут
будівельних конструкцій (НДІБК), м. Київ.

Захист відбудеться "27" жовтня 1997р. о 13 годині

На засіданні спеціалізованої вченої ради Д 03.07. 05
при Придніпровській державній академії будівництва та архітектури за
адресою:

320005, Дніпропетровськ, вул. Чернишевського 24-а.
З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці ПДАБА
320005, Дніпропетровськ, вул. Чернишевського 24-а.

Автореферат розісланий "1" жовтня 1997г.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої пали

Карпуніна А.К.

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00751505 (N)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

Робота присвячена розвитку методів розрахунку коливань фундаментів складної форми, що сприймають динамічні навантаження від встановленого на них обладнання, а також розробці нових конструктивних рішень, що ефективно знижують рівень вібрацій "агрегат - фундамент - підвалина".

Фундаменти складної форми і структури широко застосовуються в сучасному будівництві. Особливе місце займають фундаменти під енергетичне обладнання, в тому числі (в силу своєї унікальності і відповідальності) потужні турбоагрегати. Безвідмовність роботи енергетичного обладнання в першу чергу пов'язана із забезпеченням допустимого рівня вібрацій в системах агрегат (машина) - фундамент і фундамент - ґрунтова основа. Тому актуальним стає завдання забезпечення допустимого рівня коливань у всій системі "агрегат-фундамент-підвалина" (стосовно до турбоагрегатів ТФП).

На цей час нагромаджено широкий досвід вирішення різних практичних завдань, зв'язаних з вібраціями в системі агрегат-фундамент-підвалина. Зокрема, для системи ТФП розроблені і використовуються різні алгоритми розрахунку коливань її окремих елементів (статорів турбіни і генератора валопровода, фундаменту, підвалини), а також коливань всієї системи в цілому. Разом з тим, при розрахунково-теоретичному прогнозуванні динамічних характеристик фундаментних конструкцій недостатньо вивчені питання вибору адекватних розрахункових схем, особливо для фундаментів низькооборотних турбоагрегатів.

Прагнення до найбільш адекватної розрахункової схеми має наслідок неминучого ускладнення завдання для аналітичного рішення; чисельне ж дослідження також зустрічає принципові труднощі через велику кількість елементів і різку зміну параметрів системи. Тому виникає завдання побудови підходу, що зберігає простоту інженерних схем і, в той же час, дозволяє будувати рішення з будь-яким ступенем точності і достовірно визначати всі характеристики напружено-деформованого стану.

Найважливішими завданнями сучасної енергетики є реконструкція і модернізація наявного обладнання, підвищення його вібраційної надійності. В багатьох випадках реконструкції фундаментів під машини з динамічними навантаженнями визнається

доцільним застосування віброізоляції, оскільки вона дозволяє встановити на фундамент більш потужне обладнання. Разом з тим актуальним є і використання конструктивних способів зниження вібрацій фундаментів машин, наприклад, приєднання до фундаменту тим або іншим конструктивним способом бетонної підлоги, використання з'єднаних з фундаментом бетонних і металевих плит, застосування фундаментів з регульованими параметрами коливань та ін. Із зазначеного виходить актуальність досліджень, що проводяться.

Зв'язок роботи з науковими програмами.

Виконана робота зв'язана з рішенням комплексних проблем по темах ОЦ. 002.001. Ц. 09. Н6 "Провести дослідження і розробити заходи по забезпеченню і підвищенню надійності системи турбоагрегат-фундамент-підвалина заново створюваних і перспективних енергоблоків, а також методи прогнозування їх динамічної і статичної роботи" (головна організація ВНДІГ ім. Б.С. Веденєєва), а також ОЦ.031.055.16Ц.04.05.С11 "Провести дослідження, розробити методи розрахунку і принципи конструювання фундаментів, що сприймають динамічні навантаження з використанням ефективних заходів щодо зменшення рівня коливань і видати рекомендації на проектування в умовах дослідного будівництва" (головна організація НДІОБВ ім. Н.М. Герсєванова), за якими в 1980-1990 рр. виконувалися НДР 460,536,812,853 кафедрою "Основи і фундаменти" і ГНДЛ ЛАМІДОТ при ДІБІ (зараз - ПДАБА). Пошукувач є також провідним виконавцем держбюджетної НДР "Прогноз тривалих деформацій ґрунтових основ і розробка аналітичних методів розрахунку фундаментів великої площі на дію статичних і динамічних навантажень (стосовно до АЕС)", що виконувалась за темпланом Мінвугу України в 1995-1996рр.

Мета і завдання досліджень полягають в науковому обґрунтуванні і розробці аналітичних методів розрахунку на коливання фундаментів складної форми під потужні низькооборотні турбоагрегати, а також в подальшому розвитку і впровадженні конструктивних способів зниження вібрацій фундаментів, що сприймають динамічні дії.

Наукова новизна отриманих результатів:

- узагальнені результати натурних динамічних досліджень системи ТФП для декількох головних енергоблоків АЕС, що будуються, які виявили особливості і закономірності динамічної поведінки двох типів стінчастих фундаментів під низькооборотні

турбоагрегати одиничною потужністю 1000 МВт; при цьому встановлено, що, незважаючи на відмінності інженерно-геологічних і конструктивних умов, особливості динамічної поведінки фундаментів однієї конструктивної схеми однакові, змінюються лише чисельні значення характеристик, що визначаються;

- запропоновані і реалізовані алгоритми аналітичного розрахунку динамічного напруженого стану, вільних і вимушених коливань складних фундаментних конструкцій на пружній і пружно-в'язкій основах;

- побудоване точне рішення задачі про вертикальні коливання просторового стінчастого фундаменту при гармонійному навантаженні, а також виконаний аналіз поведінки конструкції в перехідному режимі, коли навантаження змінюється в часі за довільним законом;

- виконана оцінка адекватності результатів динамічного розрахунку стінчастих фундаментів по різних схемах на основі експериментальних даних, отриманих при натурних випробуваннях систем ТФП;

- виявлено вплив крутильної жорсткості, несиметрії і ширини поперечних стін при динамічному розрахунку стінчастих фундаментів;

- розглянутий з єдиної точки зору розрахунок конструкцій як стінчастих, так і рамних фундаментів на ґрунтовій основі, а також плитних, що спираються на палі під турбоагрегати;

- запропонований аналітичний метод динамічного розрахунку фундаменту з приєднаними плитами, встановлені особливості коливань фундаменту, конструктивно з'єднаного з плитами, розташованими на ґрунтовій основі;

- запропоновані перспективні рішення фундаментів, що сприймають динамічні дії.

Практичне значення отриманих результатів досліджень:

- на основі методу усереднення в поєднанні з асимптотичним спрощенням проміжних задач розроблена нова аналітична методика динамічного розрахунку фундаментів під турбоагрегати великої одиничної потужності;

- запропоновані методи динамічного розрахунку стінчастих і рамних фундаментів потужних турбоагрегатів дозволяють визначати як основні характеристики (частоти коливань, переміщення), так і повний напружено-деформований стан; це робить можливим відмовитися в більшості випадків від дорогих

ДНЕ Д.В. Стефанюк
А.І. Діаков
Україна

натурних експериментів для прогнозування динамічних властивостей складних фундаментів під енергообладнання;

- наявність простих розрахункових формул для визначення динамічних станів фундаментів складної форми істотно економить час і кошти на етапі їх проектування;

- зниження вібрацій фундаментів забезпечується шляхом різноманітного з'єднання з ними плит, що розташовуються на ґрунтовій основі, а також застосуванням фундаментів з регульованими параметрами коливань; запропонований алгоритм динамічного розрахунку системи підвалина - фундамент - приєднані плити.

Особистий вклад пошукувача полягає в аналізі і узагальненні даних натурних динамічних випробувань систем ТФП, проведених з участю автора; в розробці аналітичних методів динамічних розрахунків фундаментів складної форми для енергообладнання на основі використання асимптотичних методик досліджень; в проведенні експериментальних досліджень коливних фундаментів, з'єднаних різним типом зв'язків з плитами на ґрунтовій основі, в доповненні і розвитку методу динамічного розрахунку системи "підвалина – фундамент - приєднана плита", а також в розробці перспективних рішень фундаментів, що сприймають динамічні навантаження. В основу дисертаційної роботи покладені результати досліджень автора в період 1976-1996 рр.

Апробація результатів досліджень здійснена в ході натурних динамічних випробувань систем ТФП для фундаментів, що зводяться в різних інженерно-геологічних умовах під низькооборотні турбоагрегати на 6 головних енергоблоках АЕС одиначною потужністю 1000 МВт. Результати досліджень з аналізом динамічної поведінки систем ТФП передавалися головній проектній організації ХоАЕП і використані для корегування проектних рішень при наступному будівництві енергоблоків на кожному з майданчиків. Впровадження окремих положень роботи здійснене на рівні БНіП, а також шляхом разового використання рекомендацій по зниженню вібрацій машин з динамічними навантаженнями.

Основні результати, що складають зміст дисертації, доповідалися і обговорювалися на Міжнародному симпозіумі "Фундаменти під машини з динамічними навантаженнями" (Ленінград, 1989); VI Міжнародному симпозіумі "Проектування і практика використання обчислювальної техніки" (Загреб, Югославія, 1984); IV Міжнародній конференції з диференціальних рівнянь і їх застосування (Русе, Болгарія, 1989); другій Міжнародній

конференції “Сучасні досягнення в геотехніці, сейсмостійкому будівництві і динаміці ґрунтів” (Ролла, США, 1991); Всесоюзних конференціях з динаміки підвалин, фундаментів і підземних споруд (Ташкент, 1977 і 1981; Нарва, 1985; Дніпропетровськ, 1989); Міжнародних конгресах з теоретичної і прикладної механіки Югославії (Бечичи, 1984; Задар, 1986); І нараді співтовариства з механіки ґрунтів і фундаментобудування Хорватії (Опатія, 1989); Всесоюзній нараді “Фундаментобудування в складних ґрунтових умовах” (Алма-Ата, 1977); Всесоюзній конференції “Експериментальні дослідження інженерних споруд” (Новополюцьк, 1986); Всесоюзних науково-технічних нарадах “Підвищення надійності енергетичних споруд при динамічних діях” (Москва, 1981; 1987; 1991) і “Проектування і будівництво енергетичних об’єктів у сейсмічних районах” (Нарва, 1988); I і II Всесоюзних симпозіумах “Стійкість в механіці деформівного твердого тіла” (Калінінград, 1981; 1986); Всесоюзній конференції по вібраційній техніці (Тбілісі, 1981); III Міжнародній конференції “Проблеми фундаментобудування на палях” (Мінськ, 1992); Всесоюзній координаційній нараді-семінарі “Механізована безвідхідна технологія зведення фундаментів на палях з палів заводської готовності” (Владивосток, 1988); П’ятій Російській конференції з механіки ґрунтів і фундаментобудування (Санкт-Петербург, 1995); Польсько-українських семінарах “Теоретичні основи будівництва” (Дніпропетровськ, 1995; 1997); II Українській науково-технічній конференції з механіки ґрунтів і фундаментобудування (Полтава, 1993).

Публікації. Основні положення роботи відбиті в монографії і брошурі, а також в 50 друкованих роботах.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, аналітичного огляду, двох частин, що включають 6 глав, висновку (загального висновку по роботі), списку літератури з 248 найменувань і додатка. Містить 303 сторінки основного тексту (без додатку), 55 рисунків і 5 таблиць.

Автор висловлює глибоку вдячність своєму першому науковому керівнику к.т.н., доценту Н.С.Швець, що сприяла становленню його як дослідника в період навчання в аспірантурі, а також д.ф.-м.н., професору І.В.Андріанову за консультації у використанні автором асимптотичних методів досліджень стосовно до динамічних розрахунків фундаментів.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

В аналітичному огляді дається аналіз розвитку конструкцій фундаментів турбоагрегатів у зв'язку із зростанням енергетичної потужності останніх. Розглянуто загальний стан динамічних досліджень і методів динамічних розрахунків фундаментів під високо- і низькооборотні турбоагрегати (відповідно 3000 і 1500 об/хв). Проведено огляд конструктивних способів зниження коливань фундаментів енергообладнання.

У створення методів динамічного розрахунку фундаментів турбоагрегатів у міру зростання їхньої одиначної потужності (як систем "агрегат-фундамент", так і в цілому ТФП) внесли вклад великі дослідні колективи: Всесоюзного теплотехнічного інституту (Рунов Б.Т. та ін.); ВНДІГ ім. Б.Є.Веденєєва (Шейнін І.С., Аграновський Г.Г., Голдін А.С. та ін.); Інституту проблем машинобудування АН України (Шульженко Н.Г., Воробйов Ю.С. та ін.); ЦКТИ ім. І.І. Ползунова (Олімпієв В.І., Орлов І.І. та ін.); ГрузНДІЕГСа, (Абашідзе А.І. та ін.); НДІОСБВ ім. Н.М.Герсеванова (Льїчов В.А. та ін.); Московського енергетичного інституту (Костюк А.Г. та ін.); Дніпропетровського ІБІ (Швець Н.С., Швець В.Б. та ін.); заводів-виготовлювачів турбін ПОАТ ХТГЗ і ЛМЗ (Косяк Ю.Ф. та ін., Фрідман В.М. та ін.). В розробку і вдосконалення конструкцій фундаментів під високо- і низькооборотні турбоагрегати внесли вклад проектні інститути ЛоАЕП і ХоАЕП (Бабський Є.Г., Ільїн Л.В., Литвин І.С., Кранцфельд Я.Л., Підгорний А.Н., Семижонов Є.М., Русанов М.Є. та ін.).

Виконані дослідження показали необхідність врахування просторового характеру роботи фундаменту, а також пружних і демпфіруючих властивостей підвалін. Найбільш детально розроблені методи просторового розрахунку для рамних фундаментів під високооборотні турбоагрегати; значно менша кількість робіт присвячена вивченню динамічних характеристик масивних рамно-стінчастих фундаментів під низькооборотні ("тихохідні") турбоагрегати. Із вказаного випливає необхідність подальшого вивчення систем ТФП для фундаментів потужних "тихохідних" турбоагрегатів з метою нагромадження статистичних даних і на цій основі розвинути загальні аналітичні методи розрахунку, придатні як для стінчастих, так і рамних фундаментів.

Відзначено вклад в експериментальне і теоретичне вивчення

питання вдосконалення методів розрахунку і зниження рівня вібрацій фундаментів машин з динамічними навантаженнями таких учених: Абашідзе А.І., Аграновського Г.Г., Баркана Д.Д., Ільчова В.І., Кондина А.Д., Коренєва Б.Г., Лур'є А.І., Павлюка Н.П., Пятецького В.М., Савінова О. А., Сеймова В. М., Ставниціра Л. Р., Уздіна А.М., Цейтліна М.Г., Чорного Г.І., Швець Н.С., Шехтер О.Я. та ін. Показана перспективність використання, поряд з віброізоляцією, конструктивних способів зниження рівня вібрацій для фундаментів, що сприймають динамічні навантаження.

Проаналізовані роботи зарубіжних дослідників, що внесли істотний вклад в розвиток методів розрахунку систем машина-фундамент-підвалина (в тому числі системи ТФП): Вейнера Д., Голембіовської І., Івонена І.К., Колоушека Р., Ленца М., Маца Ю., Масопуста Р., Новака М., Рауша Е., Річардса Т., Пробста П., Фітца А. та ін.

На основі аналітичного огляду сформульовані мета і завдання досліджень.

Перша частина, що складається з трьох глав, присвячена експериментальним дослідженням і розробці аналітичних методів динамічного розрахунку фундаментів потужних турбоагрегатів.

У главі 1.1 на основі аналізу вихідних конструкцій і використовуваних розрахункових схем розглянуті особливості динамічної поведінки системи ТФП і способи визначення динамічного навантаження на фундаменти турбоагрегатів.

Динамічному розрахунку рамних фундаментів присвячена велика кількість наукових публікацій; розрахунок стінчасто-рамних фундаментів розроблений в меншій мірі. Серед методів розрахунку чільне положення зайняли чисельні методи - різні варіанти плоских стержневих систем, методу кінцевих елементів. Багато в чому ці підходи дозволяють задовольнити запити практики. Однак їхнє застосування стримується тією обставиною, що вони погано працюють в областях різкої зміни параметрів і недостатньо ефективні при варіантному проектуванні, коли йдеться про багаторазові розрахунки при різних значеннях вихідних характеристик. Нарешті, параметри вихідної конструкції і ґрунтової основи відомі лише з деякою похибкою (часто надто значною), тому точність чисельних алгоритмів може виявитися надмірною.

У зв'язку із зростанням енергетичної потужності турбоагрегатів і ускладненням просторової конструкції їх фундаментів використовувані традиційні підходи, засновані, наприклад, на

зведенні до систем з невеликою кількістю ступенів свободи, вже не можуть задовольнити практику проектування. Ставиться завдання побудови аналітичних алгоритмів проміжної складності, що, з одного боку, забезпечували б достатню для сучасних вимог точність, з іншого - були б більш прості, ніж універсальні чисельні алгоритми.

В главі 1.2 наведені дані експериментальних досліджень системи ТФП, методика яких була розроблена з урахуванням досвіду досліджень рамних фундаментів, що проводилися ВНДІГ ім. Веденєєва Б. Є., ЦКТИ ім. Ползунова І. І., ДІБІ та ін.

Натурні випробування виконувалися для рамно-стінчастих фундаментів на різних стадіях зведення енергоблоків і під час експлуатації. Програма досліджень включала такі етапи: визначення динамічних характеристик підвалини, випробування нижньої плити фундаменту, фундаменту без обладнання, системи статор-фундамент-підвалина, системи ТФП з повністю змонтованим обладнанням в пусконаладжувальний період і під час експлуатації.

Дослідження проводилися на шести різних АЕС, причому випробовувалися три фундаменти з боковими конденсаторами і сім фундаментів з підвальними конденсаторами (рис. 1, а, б). Збудження коливань системи ТФП виконувалося спеціальними віброзбудниками, що встановлювались на закладні деталі (в місцях опирання стін при випробуванні плити і в місцях майбутнього опирання підшипників при випробуванні фундаменту), а також в корпусі підшипників (при випробуванні зі змонтованим обладнанням); в пусконаладжувальний період збудження коливань здійснювалося працюючим агрегатом. При кожній установці віброзбудника послідовно створювалося вертикальне і горизонтально-поперечне гармонійне навантаження, частота якого змінювалася з кроком 1 Гц в інтервалі від 8 до 30 Гц. Реєстрацію коливань здійснювали комплектом вібровимірювальної апаратури, що дозволяє вимірювати амплітуду і фазу коливань точок системи в трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

Динамічні характеристики ґрунтів визначалися в тих випадках, коли фундаменти розташовувалися безпосередньо на ґрунтових основах або на спеціально підготовленій подушці. Випробування робилися спеціальним віброштампом з метою визначення параметрів жорсткості і демпфірування ґрунтів основи в контурі підшови фундаменту. Методика випробувань і обробки результатів

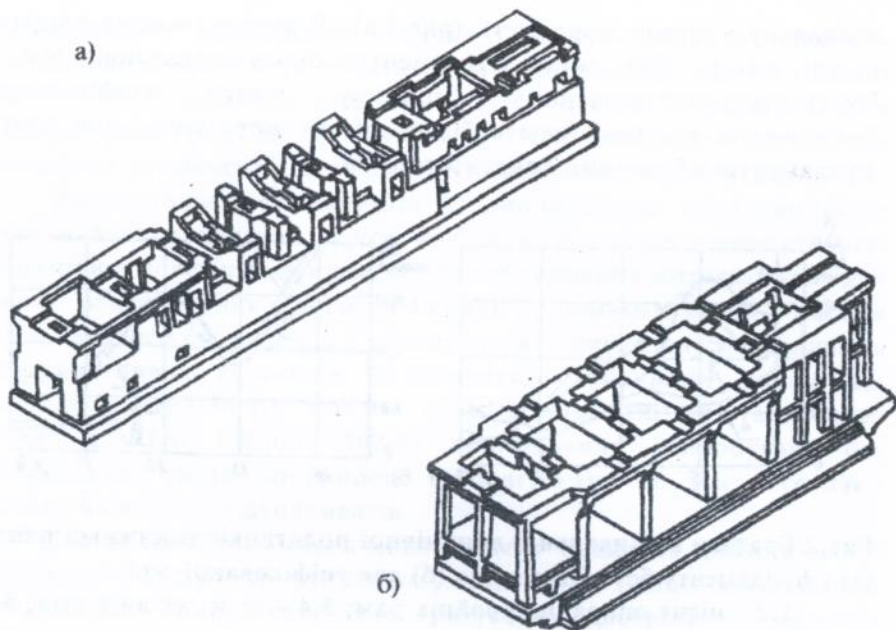


Рис. 1 Загальний вигляд випробуваних рамно-стінчастих фундаментів під турбоагрегати потужністю 1000 МВт
 А - з боковим розташуванням конденсаторів;
 Б - з підвальними конденсаторами (уніфікована серія)

розроблена Донецьким ПромбудНДІпроектот і ДІБІ. Поблизу місць установки віброштампа заздалегідь відбиралися проби ґрунту для встановлення фізико-механічних показників. Збудження коливань і заміри амплітуд вібрацій віброштампа здійснювали в діапазоні частот 10...50 Гц, причому особлива увага приділялася діапазону частот 20...30 Гц, близьких до робочої частоти низькооборотних турбін.

Динамічні випробування підвалин показали, що використовувана методика дозволяє одержувати досить надійні результати для пружних демпфіруючих характеристик зв'язних і незв'язних ґрунтів, при цьому розбіжності між максимальними і мінімальними значеннями характеристик для кожного дослідного майданчика не перевищували 25...30%. Була підтверджена залежність між фізико-механічним станом ґрунту і його динамічними характеристиками.

Випробування нижніх плит показали, що вони мають кінцеву

згинальну і зсувну жорсткість (рис.2,а). У вертикальному напрямі нижні плити обох типів фундаментів більш податливі, ніж у горизонтально-поперечному, причому плити уніфікованих фундаментів в цілому мають більш високу жорсткість, ніж плити фундаментів з боковими конденсаторами.

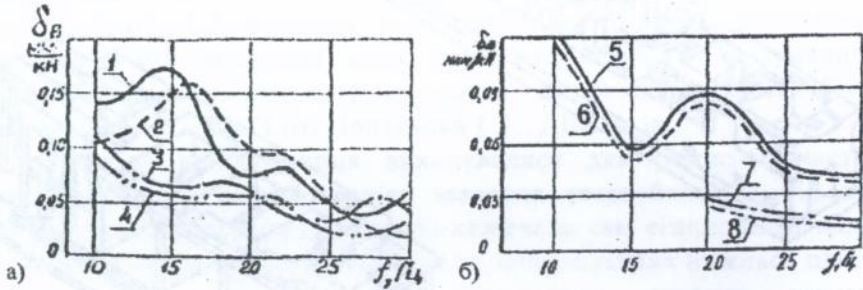


Рис.2 Графіки вертикальної динамічної податливості нижньої плити (а) і фундаменту без обладнання (б) для уніфікованої серії.

1, 2 - місця опирання крайніх рам; 3, 4 - те ж сусідніх стін; 5 - стіна, на яку встановлений вібробудник; 6 - точка на нижній плиті, розташована в безпосередній близькості від навантаженої стіни; 7, 8- сусідні (ліворуч і праворуч) ненавантажені стіни

Випробування фундаментів без обладнання виявили, що, незважаючи на різні місцеві умови, загальний характер поведінки фундаментів однієї конструкції залишається однаковим, хоча кількісні показники можуть відрізнятися один від одного. Це дозволяє знайти загальні закономірності поведінки системи в цілому. На рис. 2,б показані в залежності від частоти графіки динамічної податливості у вертикальному напрямі для поперечних стін уніфікованого фундаменту. Як видно з рис. 2,б, коливання нижньої плити і поперечної стіни фундаменту (криві 5 і 6) у вертикальному напрямі по амплітуді практично співпадають (розбіжність до 25%). Із вказаного виходить, що основна частина вертикальних коливань фундаменту визначається прогином нижньої плити і деформацією ґрунтової основи. Для фундаменту з боковими конденсаторами відзначена аналогічна картина; однак прогин нижньої плити істотно нижчий (розбіжність до 50%), оскільки в конструкції фундаменту є коробчастий елемент, в силу чого вібрації на нижню плиту передаються менше; у використуваному інтервалі

інтенсивності навантажень систему можна вважати лінійною; динамічна податливість практично не змінювалася при збільшенні амплітуди гармонійної сили на робочій частоті турбоагрегату в чотири рази (від 25 до 94.7 кН). Закономірності динамічної поведінки фундаментів для кожної з досліджених серій загальні.

Випробування фундаментів зі змонтованим обладнанням в пусконаладжувальний період показали, що певні закономірності динамічної поведінки фундаменту без обладнання зберігаються і для умов завантаження його машиною; привантаження масами встановленого обладнання в цілому знижує динамічну податливість конструктивних елементів фундаменту; особливості динамічної поведінки фундаменту можуть бути встановлені при виконанні згідно з РТМ 108.021. 102-85 приймальних випробувань без обладнання; зміна потужності турбоагрегату не має істотного впливу на вібрацію фундаментів.

Для правильного визначення спектру коливань досліджуваної стінчастої конструкції фундаменту, так же як і його динамічного напруженого стану, необхідне врахування дискретних елементів (стінок, балок, опор і т.д.). Для цієї мети не підходять часто застосовувані методи, що зводять всю систему до системи з кінцевим числом ступенів свободи. Наявність місць різкої зміни напружено-деформованого стану істотно ускладнює чисельне вирішення завдання.

Виявлений лінійний характер роботи коливної системи ТФП дозволяє використати аналітичні методи динамічного розрахунку фундаментів складної просторової форми у вигляді комбіновано-стінчастої конструкції.

В главі 1.3 подано динамічний розрахунок фундаментів стінчастого і рамного типу під потужні турбоагрегати на основі використання асимптотичних досліджень. Основна увага приділена розрахунку фундаментів стінчастого типу як недостатньо вивчених в умовах динамічного навантаження від низькооборотних турбоагрегатів.

Основними математичними методами, що використовуються в роботі (розділ 1.3.1), є методи асимптотичного аналізу, усереднення, Вишика-Люстерника, двох масштабів, причому, метод усереднення (у пропонуваній модифікації) вперше розглянутий в дисертаційній роботі. В розвиток асимптотичних методів досліджень відзначений вклад Андріанова І. В., Бахвалова Н. С., Гейзена Р. С., Маневича Л. І., Нерубайло Б. В., Зразкова І. Ф.,

Павленка А. В., Панасенко Г. П., Почтмана Ю. М. та ін.

В розділі 1.3.2. на основі проведених натурних експериментів пропонується метод динамічного розрахунку масивних стінчастих фундаментів на вертикальні коливання. Враховується, що вертикальні коливання визначаються головним чином прогином нижньої плити і підвалини; рами коливаються незалежно від сусідніх стін, на які передається основне динамічне навантаження; систему можна вважати лінійною. Для розрахунку вертикальних коливань найбільш завантаженої частини уніфікованого фундаменту розглядається плита з ребрами-стінками, жорсткість яких при вигині кінцева. Плита лежить на пружно-в'язкій лінійно деформівній підвалині; на краях плити прийняті граничні умови рівності нулю кутів повороту і перерізуючих сил.

В цьому випадку симетрія системи дасть можливість отримати точне рішення задачі як для власних, так і для вимушених коливань. Зокрема, для визначення власних частот одержується досить складне трансцендентне рівняння, аналіз якого показав таке. Нижня оцінка власних частот системи дається частотами коливань гладкої плити і ребра-балки, верхня оцінка представлена власними частотами конструктивно-ортотропної пластини. З усіх власних частот розглядуваної системи можна виділити такі групи:

А) частоти коливань без "захвату" ребер, що відповідають коливанням гладкої пластини з переважним хвилеутворенням в напрямі ребер;

Б) частоти "пластинчастих защемлених на ребрах" форм коливань, які при малих значеннях можуть бути знайдені по конструктивно-ортотропній теорії, а при більших - як частоти коливань гладкої пластини;

В) "балочні" частоти коливань, які при малих значеннях визначаються по конструктивно-ортотропній теорії, а при більших - як частоти власних коливань ребра-балки.

Для розрахунку на вимушені коливання застосовується перетворювач Лапласа в часі. Отримано точне рішення в області зображень по Лапласу і вказаний ефективний наближений спосіб аналітичної побудови оригіналу. В якості прикладу в роботі досліджена поведінка фундаменту і побудована функція залежності деформацій від часу в перший момент після прикладення навантаження у вигляді окремого імпульсу. В кінці розділу наведена оцінка основних результатів теоретичного аналізу динамічної поведінки розглядуваної конструкції і вказана область можливого

практичного застосування отриманих рішень. Крім того, отримане точне рішення задачі про розрахунок стінчастого фундаменту при врахуванні ширини стін.

Методика динамічного розрахунку власних коливань фундаментів стінчастого типу в загальному випадку описана в розділі 1.3.3. Розрахункова схема - гнучкі коливання ребристої плити на пружній підваulinі наведена на рис. 3.

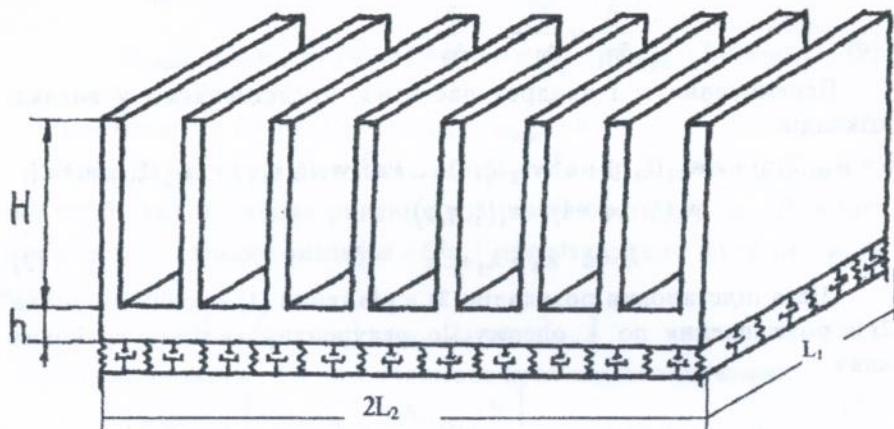


Рис. 3 Розрахункова схема стінчастого фундаменту

Перше завдання - визначення частот і форм власних коливань прямокутної ($0 \leq x \leq L_1$, $-L_2 \leq y \leq L_2$) плити на пружній вінклеровій підваulinі жорсткості c_1 , підкріпленої регулярним силовим набором з $N=2k+1$ ребер згинальною жорсткістю $E_c I$ і щільністю $\rho_c F$. Вихідне рівняння можна подати в такому безрозмірному вигляді:

$$[1 + \alpha \Phi(\varphi)] w_{\xi\xi\xi\xi} + 2w_{\xi\xi\eta_1\eta_1} + w_{\eta_1\eta_1\eta_1\eta_1} + [c - \lambda(1 + \rho\Phi(\varphi))] w = 0, \quad (1)$$

$$\text{Де } (\xi, \eta_1) = (x, y)/2L_2; \rho = \frac{\rho_c F}{\rho_0 h b}; c = \frac{16c_1 L_2^4}{D}; \alpha = \frac{E_c I}{D b}; \varphi = \frac{y}{b}; b = \frac{2L_2}{N-1};$$

$$\Phi(\varphi) = \sum_{-0.5(N-1)}^{0.5(N-1)} \delta(\varphi - i); \delta(\dots) - \text{дельта-функція Дірака.}$$

Крайові умови:

$$w_{\eta_1} = w_{\eta_1\eta_1} = 0 \text{ При } \eta_1 = \pm 0.5; w_{\xi} = w_{\xi\xi} = 0 \text{ при } \xi = 0, \ell, \ell = L_1/2L_2. \quad (2)$$

Будемо вважати параметр $\epsilon = b/2L_2$, що характеризує частоту розташування ребер, малим ($\epsilon \ll 1$). Для задач фундаментобудування співвідношення вихідних параметрів відмінні від розглянутих

раніше в літературі (в нашому випадку $\rho \omega^2 \sim DN^4, c \sim DN^4, \alpha \sim \varepsilon^{-1}$), тому граничні системи мають інший, у порівнянні з відомими результатами, вигляд. Приймаємо параметр $\rho \sim 1$ в силу його незначного впливу при побудові асимптотики і використаємо метод двох масштабів, вводячи замість однієї змінної дві: "повільну" η і "швидку" $\varphi = \eta_1/\varepsilon$. Тоді

$$\frac{\partial}{\partial \eta_1} = \frac{\partial}{\partial \eta} + \varepsilon^{-1} \frac{\partial}{\partial \varphi}.$$

Переміщення w і квадрат частот λ представляємо у вигляді розкладів:

$$w = w_{00}(\xi, \eta) + \varepsilon w_{01}(\xi, \eta) + \varepsilon^2 w_{02}(\xi, \eta) + \dots + \varepsilon^3 [w_1(\xi, \eta, \varphi) + \varepsilon w_2(\xi, \eta, \varphi) + \dots];$$

$$w_i(\xi, \eta, \varphi + 1) = w_i(\xi, \eta, \varphi);$$

$$\lambda = \varepsilon^{-1} \lambda_0 + \lambda_1 + \dots \quad (3)$$

Після підстановки розкладів (3) в рівняння (1) і граничні умови (2) і розщеплення по ε одержуємо рекурентну систему крайових задач:

$$w_{1\varphi\varphi\varphi\varphi} - \lambda_0 w_1 + c w_1 + \left[c + \alpha \Phi \frac{\partial^4}{\partial \xi^4} - \lambda_0 (1 + \rho \Phi) \right] w_{00} = 0;$$

$$w_{2\varphi\varphi\varphi\varphi} - \lambda_0 w_2 - \lambda_1 w_1 + c w_2 + \left[c + \alpha \Phi \frac{\partial^4}{\partial \xi^4} - \lambda_0 (1 + \rho \Phi) \right] w_{01} - \quad (4)$$

$$- \lambda_1 (1 + \rho \Phi) w_{00} = -4 w_{1\varphi\varphi\varphi\eta} - \nabla^4 w_{00};$$

$$\text{При } \xi = 0, \ell \quad w_{(0i)\xi} = -w_{(i-2)\xi}, \quad w_{(0i)\xi\xi\xi} = -w_{(i-2)\xi\xi\xi};$$

$$\text{При } \eta = \pm 0.5 \quad w_{(0i)\eta} = -w_{(i-1)\varphi} - w_{(i-2)\eta}, \quad w_{(0i)\eta\eta\eta} = -w_{(i-1)\varphi\varphi\varphi} - w_{(i-2)\eta\eta\eta}.$$

Виконаємо у співвідношеннях (4) усереднення, застосувавши до кожного доданка оператор $\left(\overline{\dots} \right) = \frac{1}{N+1} \int_{-0.5}^{0.5(N+1)} f(\dots) d\varphi$.

При цьому $\tilde{w}_{0i} = w_{0i}$, $\tilde{\Phi} = 1$, $\tilde{w}_{i\varphi} = 0$, а усередненні крайові задачі приймають вигляд

$$\Pi_0 w_{00} \equiv \left[\alpha \frac{\partial^4}{\partial \xi^4} + c - (1 + \rho) \lambda_0 \right] w_{00} = 0; \quad (5)$$

$$\Pi_0 w_{01} - \lambda_1 (1 + \rho) w_{00} = -\nabla^4 w_{00}; \quad (6)$$

$$\text{При } \xi = 0, \ell \quad w_{(0i)\xi} = -\tilde{W}_{(i-2)\xi}; \quad w_{(0i)\xi\xi\xi} = -\tilde{W}_{(i-2)\xi\xi\xi}; \quad (7)$$

$$\text{При } \eta = \pm 0.5 \quad w_{(0i)\eta} = -\tilde{W}_{(i-2)\eta}; \quad w_{(0i)\eta\eta\eta} = -\tilde{W}_{(i-2)\eta\eta\eta}. \quad (8)$$

Швидкозмінні періодичні функції w_i визначаються з співвідношень

$$w_{1\varphi\varphi\varphi\varphi} - \lambda_0 w_1 + c w_1 = \Pi_1 w_{00} \equiv \left(\alpha \frac{\partial^4}{\partial \xi^4} - \lambda_0 \rho \right) w_{00};$$

$$w_{2\varphi\varphi\varphi\varphi} - \lambda_0 w_2 - \lambda_1 w_1 + c w_2 = \Pi_1 w_{01} - 4w_{1\varphi\varphi\varphi\eta} - \lambda_1 \rho w_{00}; \quad (9)$$

$$\text{При } \varphi = \pm i, \quad i = 0, 1, \dots, (N+1)/2, \quad w_{i\varphi} = w_{i\varphi\varphi} = 0. \quad (10)$$

Функції w_i не задовольняють граничним умовам при $\xi = 0, \ell$, тому необхідна побудова рішення пограничного шару w_{Π} . Для цієї мети вводимо швидко змінну $\psi = \xi/\varepsilon$ і представляємо функцію w_{Π} у вигляді розкладу

$$w_{\Pi} = \varepsilon^3 \{ w_{\Pi 1}(\xi, \eta, \varphi, \psi) + \varepsilon w_{\Pi 2}(\xi, \eta, \varphi, \psi) + \dots \} \quad (11)$$

Складові розкладу (3) визначаються крайовими задачами:

$$w_{\Pi 1\psi\psi\psi\psi} + 2w_{\Pi 1\psi\psi\varphi\varphi} + w_{\Pi 1\varphi\varphi\varphi} = 0; \quad (12)$$

$$\text{При } \varphi = 0, \ell \quad w_{\Pi 1\varphi} = 0, \quad w_{\Pi 1\varphi\varphi} = 0,$$

$$\text{При } \psi = 0, \varepsilon^{-1} \ell \quad w_{\Pi 1\psi} = 0, \quad w_{\Pi 1\psi\psi\psi} = 0, \quad (13)$$

Рекурентні системи крайових задач (5) - (10), (12), (13) дозволяють визначати частоти і форми коливань з точністю до будь-якого ступеня ε , однак на практиці, як правило, достатньо обмежитися першими членами відповідних розкладів.

Поправки до квадрату частоти λ_i знаходяться з виразів наступних наближень.

Оцінка вірогідності побудованих рішень тут і далі здійснювалася таким чином. По-перше, відомі точні рішення окремих задач розкладаються в ряди по параметру, що використовується. Відповідні члени розкладів співпадають з рішеннями за пропонованою в роботі методикою. По-друге, порівняння результатів розрахунку за отриманими формулами з відомими в літературі чисельними і експериментальними даними також підтверджують достатню точність перших наближень.

Отримані аналітичні рішення реалізовані на ЕОМ, а результати

розрахунків відбиті на рис. 4-7 для стінчастих фундаментів під турбоагрегати потужністю 1000 МВт.

На рис. 4 представлені криві залежностей головних власних частот коливань фундаменту від співвідношення жорсткостей $c_1/6E = \bar{c}$ в діапазоні 10-6 - 10-1, де E - модуль Юнга бетону фундаменту, c_1 - жорсткість підвалини. Встановлено, що вплив жорсткості підвалини на головні власні частоти незначний. Відмінності в частотах між мінімальними і максимальними значеннями \bar{c} не перевищують 6%.

На основі аналізу поведінки кривих 1-3, зображених на рис. 5, можна стверджувати, що збільшення щільності матеріалу стінок призводить до збільшення перших власних частот. Кривій 1 відповідає $\alpha = 1$; 2 - $\alpha = 50$; 3 - $\alpha = 80$.

На рис. 6 зображені графіки залежностей головних власних частот від співвідношення наведених жорсткостей α . Встановлено, що із збільшенням інерційних і жорсткісних характеристик верхньої будівлі фундаменту спостерігається зростання власних частот в діапазоні $\alpha = 1-80$. На ділянці $\alpha = 80-130$ відбувається уповільнення цього процесу, а на ділянці $\alpha = 130-180$ - стабілізація частот приблизно на одному рівні. Кривій 1 відповідає значення $\bar{\rho} = 0,1$; 2 - $\bar{\rho} = 1$; 3 - $\bar{\rho} = 3$, де $\bar{\rho} = \rho_c/\rho_0$.

Форми власних коливань стінчастих фундаментів зображені на рис. 7. Ситуація, відбита на цьому рисунку, є загальною - переміщення w (крива 3) складається з "повільної" (усередненої) складової w_0 (крива 2) і "швидкої" з періодом, рівним відстані між ребрами, поправки w_1 (крива 1). На основі аналізу поведінки кривої 3 можна стверджувати, що простежується тенденція зростання амплітуд власних коливань в напрямі від краю плити до її центра, де і знаходяться максимальні значення. Порівняння з точним рішенням, отриманим в 1.3.2, (крива 4) підтверджує застосовність методу.

В розділі 1.3.4 наведений розрахунок АЧХ вимушених коливань стінчастих фундаментів на прикладі задачі про гнучкі коливання ребристої плити при навантаженні вертикальними зосередженими силами в центрі ребер - стінок по поздовжній осі плити. Ребра- стінки розглядалися в рамках спрощеної плоскої теорії пружності (Маневич Л.І., Павленко А.В., Коблик С.Г.). Застосовувались інтегральне перетворення Лапласа в часі і метод поділу змінних.

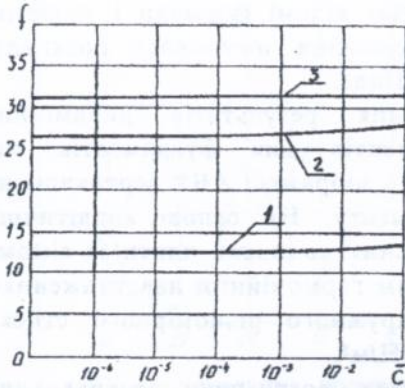


Рис. 4 Залежність частоти коливань від жорсткості підвалини

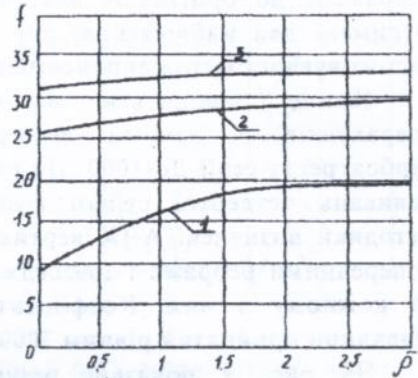


Рис. 5 Оцінка відносної щільності на основну частоту коливань

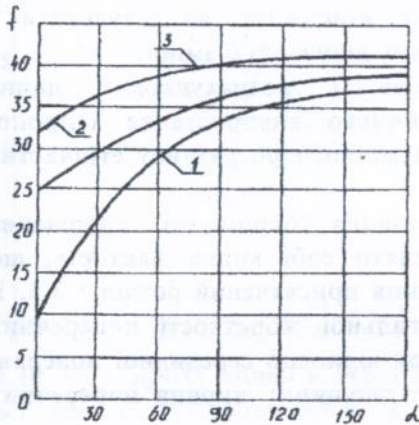


Рис. 6 Вплив відносної жорсткості на частоту головних коливань

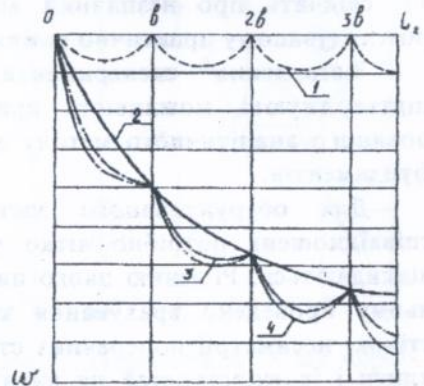


Рис. 7 Форма власних коливань стінчастого фундаменту

В результаті отрималися дві нескінченні системи зв'язаних алгебраїчних рівнянь, що мають явну діагональну перевагу. Для їх рішення застосовувався асимптотичний метод, суть якого полягає ось в чому. На початку в рівняння при не діагональних членах

вводиться штучний малий параметр ϵ і розшукуємо рішення у вигляді ряду по ϵ , а після цього приймається $\epsilon=1$. Для переходу від зображень до оригіналів використані відомі формули і теореми. Отримані два наближення; для подолання локальності розкладів застосовувався метод апроксимацій Паде.

Нижче наводиться зіставлення результатів динамічних розрахунків з даними експериментів для фундаментів під турбоагрегат серії До-1000. На рис. 8 зображені АЧХ вертикальних коливань четвертої стінки фундаменту. На основі аналітичної методики визначені АЧХ вертикальних коливань плити із сімома поперечними ребрами і зосередженим гармонійним навантаженням на кожному з них. Коефіцієнт пружного рівномірного стиску підвалини прийнятий рівним 30000 кН/м^3 .

На рис. 9 показані результати розрахунку вертикальних коливань 1-3 стінок фундаменту при коливаннях, що встановилися. На рис. 10 зображені АЧХ другої стінки при пуску турбоагрегату і наборі оборотів до робочої частоти. Криві залежностей АЧХ фундаментів від величини жорсткості підвалини, показані на рис. 11, свідчать про незначний вплив жорсткості на результати в розглядуваному практично важливому діапазоні її зміни.

Зіставлення експериментальних і розрахункових даних підтверджують можливість практичного використання запропонованого аналітичного методу динамічного розрахунку стінчастих фундаментів.

Для обґрунтованого застосування отриманих спрощених співвідношень потрібно чітко уявляти собі вплив факторів, що відкидаються. Рішенню цього питання присвячений розділ 1.3.5. В ньому проведено врахування крутильної жорсткості поперечних стінок; несиметрії поперечних стінок відносно серединної поверхні плити і їх жорсткостей на вигин з площини; ширини поперечних стінок.

Задача про коливання фундаментів рамного типу в більшій мірі, ніж задача для стінчастого фундаменту, піддається дискретизації і тому досить добре вивчена. У зв'язку з цим в розділі 1.3.6 наведені лише основні результати аналітичного дослідження. Як приклад розрахунку розглянута задача, для якої відомо (ЛОТЕН) чисельне рішення і експериментальні дані - фундамент під турбоагрегат ТКД-200. Конструкція фундаменту являє собою масивну монолітну залізобетонну раму, змонтовану на нижній залізобетонній плиті. Рама складається з восьми стояків

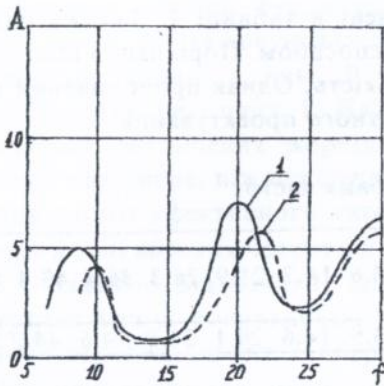


Рис. 8 АЧХ вертикальних коливань четвертої стінки турбоагрегату в робочому режимі 1 - розрахунок; 2 - фундаменту при коливаннях, що експеримент

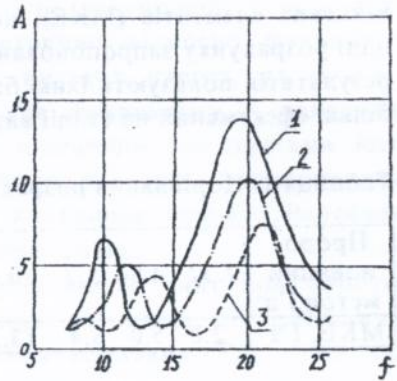


Рис.9 АЧХ розрахункових вертикальних коливань 1,2 і 3 стінок встановилися

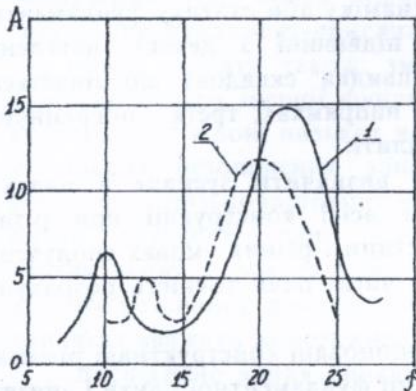


Рис.10 АЧХ другої стінки в переходному режимі 1 - розрахунок; 2 - експеримент

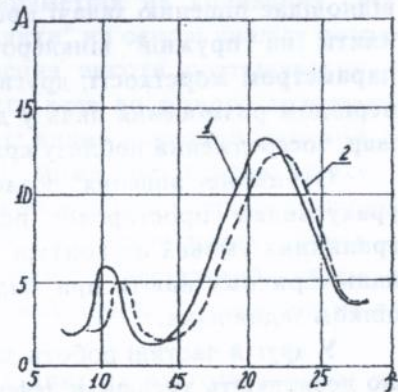


Рис.11 Залежність АЧХ від жорсткості підвалини 1 - жорстка; 2 - податлива

(залізобетонних колон) однакового перерізу (2000 x 2500 мм) і висоти (4200 мм), жорстко з'єднаних у верхній частині поперечними і поздовжніми балками різної довжини і перерізів. Нижні частини стоек жорстко защемлені в нижній монолітній залізобетонній плиті. Довжина плити 38 м, ширина 7.8 м, товщина 3 м, жорсткість підвалини $C_{zmin}=19000$ кН/м³; $C_{zmax}=105000$ кН/м³; модуль пружності бетону $E_b=2.9 \cdot 10^7$ кН/м²; $G_b=1.1640 \cdot 10^7$ кПа; коефіцієнт Пуассона $\nu=0.16$.

Частоти коливань фундаменту, отримані на ЕОМ методом кінцевих елементів (МКЕ), наведені в таблиці 1. Тут же наведені дані розрахунку запропонованим способом. Порівняння відповідних результатів показують їхню близькість. Однак запропонований метод більш ефективний на стадії варіантного проектування.

Таблиця 1 Порівняння розрахункових частот

Про- понований метод, Гц	2.52	4.84	5.2	10.0	13.6	14.7	21.9	26.3	36.4	43.4	64.7
МКЕ, Гц	2.8	5.0	6.4	13.5	13.9	14.6	20.1	24.8	34.6	44.2	56.3

В цьому розділі запропонований метод розрахунку фундаментної плити на пальовій підвалині, що враховує спільну роботу паль і ростверка. У відповідності з ідеєю методу усереднення рішення подається у вигляді суми трьох складових. Перша відповідає рішенню задачі про динаміку або статику фундаментної плити на пружній вінклеровій підвалині з деяким наведеним параметром жорсткості; друга - "швидка" складова, що міняється з періодом розміщення паль у двох напрямках; третя - пограничний шар, зосереджений поблизу країв плити.

Отримане рішення дозволяє визначити зусилля в палях з урахуванням просторової роботи всієї конструкції при різних граничних умовах на контурі пластини і різних умовах сполучення паль, причому навіть при малому числі паль точність розрахунку цілком задовільна.

У другій частині роботи запропоновані конструктивні рішення, що дозволяють зменшити деформації фундаментної плити і знизити вібрації фундаментів, проведено їх дослідження.

В главі 2.1 наведено вивід диференціальних рівнянь спільних коливань фундаменту і приєднаних плит, що описують основні використовувані на практиці види сполучення фундаменту з плитами: горизонтальні і вертикальні в'язко-пружні зв'язки; жорстке сполучення; шарнірно-рухомий і шарнірно-непорушній зв'язки. На основі побудованих рівнянь проведені теоретичні дослідження впливу параметрів фундаменту, плит і характеристик ґрунтової підвалини на амплітуди вимушених і частоти власних коливань фундаменту.

На рис.13 наведені криві, що відбивають результати дослідження впливу зміни жорсткості ґрунтової підвалини під плитами

(суцільна лінія) і під фундаментом без плит (пунктирна лінія) на зменшення вібрації фундаменту. В розрахунковій схемі прийнято, що плити розташовуються симетрично відносно фундаменту і жорстко з'єднані з ним. В зоні низьких частот, де $\bar{\omega} < 0.8$ для фундаменту без плит і $\bar{\omega} < 1.2$ для фундаменту з приєднаними плитами, збільшення жорсткості підвалини під плитами істотно більш ефективно, ніж під фундаментом, причому в першому випадку зона частот ефективного гасіння коливання ширша. Застосування плит в зоні високих частот $\bar{\omega} \geq 2$ неефективне.

Важливо відзначити, що ефективність плит при боротьбі з вертикальними коливаннями на порядок нижча, ніж для зниження рівня горизонтальних і обертальних коливань. Так, зона частот ефективного гасіння зменшується в цьому випадку до $\bar{\omega} \leq 1.2$.

Аналіз інших розрахункових випадків показує, що найбільш ефективна схема приєднання плит - жорстке закладення у фундаменті, після цього - шарнірно-непорушне і шарнірно-рухоме сполучення. Про вплив інших параметрів на коливання системи "підвалина-фундамент-приєднані плити" на основі аналізу розрахунків можна сказати також: зменшення висоти розташування плит відносно центра інерції фундаменту веде до різкого зменшення їх ефективності в зоні низьких частот; вплив дисипації істотний лише у вузьких резонансних зонах і може не враховуватися при розрахунку низькочастотних коливань в зоні до першого резонансу; вплив гнучкості плит істотний в резонансних зонах для вертикальних і обертальних коливань і несуттєвий, окрім зони другого резонансу, для горизонтальних; при $\bar{\omega} > 3$ плити можна в усіх випадках вважати жорсткими.

Досліджено вплив приєднаних плит на частоти власних коливань системи "підвалина-фундамент-приєднані плити". Важливість цього питання зумовлена необхідністю відстройки частот коливань фундаменту від резонансів. Найбільш ефективним способом одночасного підвищення усіх резонансних частот фундаменту з плитами є збільшення площі плит або жорсткості підвалини, що можна здійснити за рахунок ущільнення ґрунту під ними, заміни природного ґрунту більш жорстким, застосуванням коротких набивних паль та ін. Найбільш ефективна схема сполучення фундаменту з плитою для відстройки резонансних частот є жорстке закладення.

Отримані результати теоретичного аналізу дозволяють зробити висновок: приєднання плит призводить до підвищення власних

частот коливань фундаменту і їх можна використати для відстройки резонансних частот; за рахунок збільшення висоти розташування плит відносно підшви фундаменту можна збільшити власну частоту горизонтальних коливань; при визначенні власних частот плити можна вважати жорсткими і не враховувати демпфірування. Встановлено, що приєднання плит призводить до появи нових резонансів системи, однак вони лежать значно вище резонансів одиночного фундаменту.

Експериментальними дослідженнями (глава 2.2) встановлено, що:

- приєднані плити мають істотний вплив на параметри горизонтально-обертальних коливань масивних фундаментів, при цьому амплітуди коливань фундаменту в дорезонансній зоні і в зоні першого резонансу зменшуються, а резонансна частота підвищується;

- застосовувати приєднані плити для зниження вертикальних і горизонтально-обертальних коливань масивного фундаменту в зоні другого резонансу недоцільно;

- збільшення площі плити і її тиску на ґрунтову підвалину сприяє зниженню амплітуд коливань фундаменту і збільшенню власної частоти системи "підвалина-фундамент-приєднані плити".

Проведеними експериментами підтверджена правильність отриманих теоретичних результатів. Порівняння теоретичних і експериментальних результатів наведено на рис.14, з якого видно, що збіг кривих 1 і 2 задовільне, особливо в зоні низьких частот. В резонансній зоні розбіжність складає 17%.

Аналітичне дослідження при деяких додаткових спрощуючих припущеннях дозволило отримати формули для підбору параметрів плит, що приєднуються, необхідних для зниження амплітуд вимушених горизонтальних коливань фундаменту в n разів.

Для загального випадку коливань досліджуваної системи отримані формули для визначення амплітуд вимушених коливань фундаменту в припущенні, що фундамент розглядається як зосереджена маса, а плити - як балки на пружній підвалині.

Практичні рекомендації по застосуванню конструктивних рішень, що забезпечують зниження рівня вібрацій фундаментів машин, а також впровадження результатів досліджень відбиті в главі 2.3.

Спосіб зменшення коливань фундаментів за допомогою приєднаних плит орієнтований, в основному, на стаціонарний режим роботи машин. Коливання фундаментів машин, що

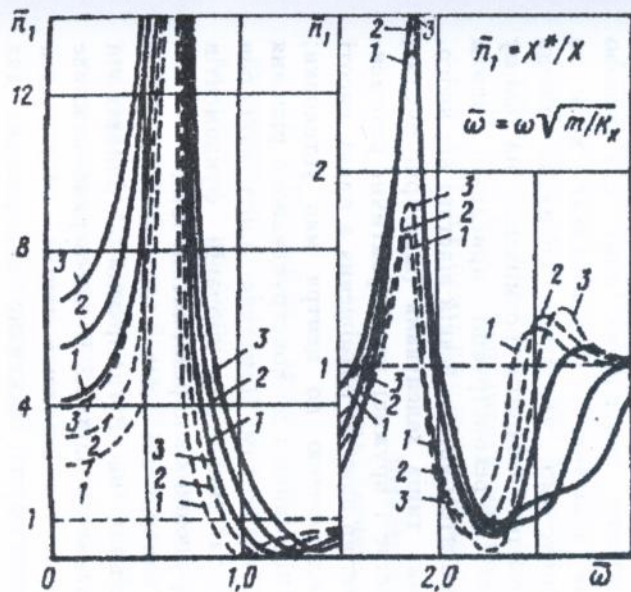


Рис. 13 Залежність зменшення в π разів амплітуд коливань фундаменту після приднання плит від безрозмірної частоти ω ;

1 - $\bar{k} = 0.5$; 2 - 0.75; 3 - 1.0; де $\bar{k} = k^*/k_x$;
 k^* - додаткова жорсткість;
 k_x - коефіцієнт жорсткості підвалини при пружному рівномірному зсуві

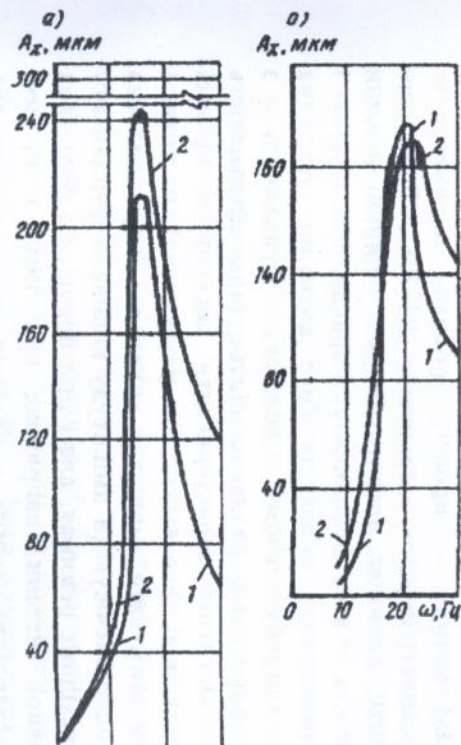


Рис.14 Порівняння теоретичних і експериментальних значень амплітудно-частотних характеристик фундаменту з приданими плитами

а - без бокової засипки; б - при її наявності;
 1 - експеримент; 2 - теорія.

відмічаються при перехідних режимах (наприклад, при переході через резонанс в процесі розгону і вибігу) можуть бути знижені (розділ 2.3.1) за рахунок застосування системи машина-фундамент-плита з регульованими в процесі роботи параметрами. Запропонований пристрій (авт. свідоцтво 947291 СРСР), що міститься на плиті, дозволяє оперативнo без зупинки машини змінювати жорсткість зв'язку фундаменту з приєднаною плитою і завдяки цьому зменшувати амплітуду його коливань. Дослідна перевірка на випробувальному полігоні фундаменту з регульованими параметрами коливань підтвердила ефективність зміни амплітудно-частотної характеристики системи в процесі роботи, можливість відстроюватись від резонансної частоти і значно (в 3-5 раз) знижувати амплітуду коливань. Запропонована конструкція дозволяє зменшувати амплітуду коливань фундаменту не тільки при перехідних режимах, але і при порушенні будь-яких параметрів коливної системи, наприклад при зміні в процесі експлуатації характеристик ґрунтів і підвалин, маси системи або кутової швидкості машини після її модернізації.

Рекомендації по практичному використанню приєднаних плит (розділ 2.3.2) базуються на результатах проведених досліджень, показали принципову можливість отримання системи машина-фундамент-плита з необхідними амплітудно-частотними характеристиками. Так, використання приєднаних плит для заново проєктованих фундаментів доцільне в тих випадках, коли за умовами забезпечення допустимої амплітуди коливань площа фундаменту значно перевищує габарити розміщеної на ньому машини. При підсиленні і реконструкції приєднані плити розміщують поруч з фундаментом або на деякій відстані від нього. Для кожного з досліджених типів зчленувань (шарнірно-рухоме, шарнірно-непорушне, жорстке і пружне) дані практичні рекомендації по розрахунку параметрів плит, їх розміщення в плані, висоті розташування плит по відношенню до центра мас установки; сформульовані вимоги до підвалини і до конструктивного рішення вузла з'єднання плити з фундаментом. Приєднані плити найбільш доцільно застосовувати для зменшення вібрацій фундаментів низькочастотних машин, працюючих в дорезонансній зоні.

Приєднані плити використані для зниження вібрацій фундаментів енергообладнання на Вуглегірській і Запорізькій ДРЕС. Досвід їх застосування (розділ 2.3.3) підтвердив важливе теоретичне положення про те, що такі плити, збільшуючи жорсткість системи, можуть бути ефективно використані для

відстройки її від резонансу. Економічний ефект від впровадження склав 150 тис. крб. у цінах 1980 року. Крім того, результати дослідження автора по приєднаних плитах, як одному з ефективних конструктивних способів зниження вібрації фундаментів машин з динамічними навантаженнями, знайшли відображення у вигляді самостійного розділу в підготовленому НДІОБВ до видання "Керівництві до БНіП 2.02. 05'-87".

Як показали експериментальні дослідження, найбільш ефективна робота приєднаних плит у випадку жорсткого з'єднання з фундаментом. В ролі таких плит можуть виступати і спеціальні консольні виступи у вигляді жорстких залізобетонних ребер. Такі ребра, як і плити, влаштовують з двох або чотирьох сторін по периметру фундаменту. Для підсилення фундаменту під машини з динамічними навантаженнями часто використовують залізобетонні обойми. Коли застосування обійм підсилення зумовлене не тільки фактом порушення цілісності фундаменту, але і необхідністю зниження коливань, можуть бути використані також включені в обійму палі - бурові, набивні, задавлювані тісі або іншої довжини. Використання виносних паль можливе і у випадках включення їх у спільну роботу з приєднаними плитами або жорсткими ребрами. Таке конструктивне рішення може бути застосоване і для влаштування заново проєктованих фундаментів під машини у відносно слабких ґрунтах.

Загальний економічний ефект від впровадження результатів досліджень склав більш 600 тис. крб. в цінах 1980 - 1990 років. Окремі положення виконаних досліджень знайшли відображення в БНіП 2.02. 05-87 "Фундаменти машин з динамічними навантаженнями" (автор входить в колектив укладачів).

ВИСНОВОК

(загальні висновки по роботі)

1. В роботі запропоновані і реалізовані алгоритми аналітичного розрахунку динамічного напруженого стану, вільних і вимушених коливань складних просторових конструкцій фундаментів на пружній і пружно-в'язкій підвалинах. Вказані аналітичні рішення базуються на асимптотичних методах, зокрема, методах усереднення і асимптотичної декомпозиції. При цьому усередненні співвідношення виступають як перше наближення, а врахування реальної структури конструкції виробляється за допомогою асимптотичного інтегрування диференціальних рівнянь

з швидкозмінними правими частинами і граничними умовами.

Для визначення парціальних частот виробляється декомпозиція системи. Істотно, що, поряд з переміщеннями і частотами коливань, вірогідно визначається і повний напружено-деформований стан конструкції.

2. Запропоновані алгоритми використані при розрахунку стінчастих і рамних фундаментів на природній і пальної підвалинах під турбоагрегати великої потужності. З метою з'ясування основних якісних особливостей поведінки системи турбоагрегат - фундамент - підвалина для потужних турбоагрегатів, побудови реалістичних розрахункових схем і виявлення можливості їх спрощення проведені комплексні натурні динамічні випробування. Випробування по розробленій методиці дозволили отримати великий обсяг вірогідної інформації без порушення графіка будівельно-монтажних робіт.

3. Результати натурних динамічних досліджень системи ТФП виявили, що фундаменти рамно-стінчастої конструкції під низькооборотні турбоагрегати потужністю 1000 МВт мають загальні особливості динамічної поведінки, незважаючи на відмінності конструктивних схем і ґрунтових умов.

Динамічні дослідження виконані для двох конструктивних схем фундаментів турбоагрегатів (з боковим - виносним і з підвальним розташуванням конденсаторів), на природній, штучній і пальної підвалинах, при цьому встановлено:

- використані методики проведення динамічних випробувань ґрунтів і обробки експериментальних даних забезпечують досить надійні результати; розбіжності між максимальними і мінімальними значеннями жорсткісних і демпфіруючих характеристик, що визначаються на дослідному майданчику, не перевищують 30%;

- нижні плити фундаментів мають кінцеву згинальну і зсувну жорсткість, що необхідно враховувати при розрахунку фундаментів на динамічні дії; максимальні значення амплітуд коливань і динамічної податливості виявлені на кінцях плит;

- вертикальні коливання фундаментів визначаються, в основному, деформаціями нижніх плит і ґрунтової підвалини; динамічна податливість конструктивних елементів фундаменту у вертикальному напрямі нижча, ніж в горизонтально-поперечному;

- привантаження фундаменту масами встановленого обладнання знижує динамічну податливість його конструктивних елементів.

Виявлений натурними динамічними дослідженнями лінійний характер роботи коливної системи дозволяє використати аналітичні методи динамічного розрахунку фундаментів комбінованої рамно-стінчастої конструкції.

4. Натурними динамічними дослідженнями виявлено, що для правильного визначення спектра коливань досліджуваної рамно-стінчастої конструкції фундаментів, рівно як і його динамічного напруженого стану, необхідне правильне врахування дискретних елементів (стінок, балок, опор та ін.). Для цієї мети не підходять методи розрахунків, що зводять всю систему до системи з кінцевим числом ступенів свободи, а також прийоми, що замінюють вихідну дискретну систему деякою однорідною. Наявність місць різкої зміни напружено-деформованого стану істотно ускладнює чисельне рішення задачі.

Використання асимптотичних методів показало, що для деяких огрублених схем (однак більш коректних, ніж ті, що застосовуються в звичайній інженерній практиці) можлива побудова точних рішень, які можуть служити еталоном при оцінці чисельних і наближених аналітичних методів. Зокрема, побудоване точне рішення задачі про вертикальні коливання просторового стінчастого фундаменту при гармонійному навантаженні, а також виконаний аналіз поведінки конструкції в перехідному режимі, коли навантаження змінюється в часі за довільним законом.

Аналіз точного рішення дозволив виділити граничні випадки, що описують в сукупності всі явища в цілому. Зіставлення експериментальних і розрахункових даних підтверджує можливість практичного використання запропонованого методу динамічного розрахунку масивних стінчастих фундаментів.

5. Побудовані аналітичні вирази для спектра частот і форм власних коливань, а також знайдені аналітичні вирази АЧХ фундаментів стінчастого типу при вимушених коливаннях.

Досліджений вплив жорсткісних і інерційних характеристик верхньої будівлі, щільності матеріалу стінок, жорсткості підвалини на головні власні частоти і АЧХ вимушених коливань фундаменту турбоагрегатів. Встановлено, що інерційні і жорсткісні параметри верхньої будівлі мають істотний і складний вплив на головні власні частоти системи; збільшення щільності матеріалу стінок призводить до зростання власних частот фундаменту; вплив жорсткості підвалини на власні частоти і АЧХ вимушених коливань фундаменту незначний в розглядуваному практично важливому

діапазоні її зміни.

6. З єдиної точки зору розглянуто розрахунок конструкцій як стінчастих, так і рамних фундаментів на природній і пальної підвалинах. Для цього спочатку будуються усереднені співвідношення, що в ряді випадків зазнають подальшого спрощення з метою побудови аналітичних рішень. Після цього добудовуються локальні рішення, що враховують притаманні задачі особливості і основні характерні параметри розглядуваних конструкцій фундаментів.

Основною перевагою запропонованого аналітичного підходу є можливість в багатьох випадках відмовитися від дорогих натурних випробувань при прогнозуванні динамічних особливостей поведінки стінчастих фундаментів під турбоагрегати.

7. Для придушення небажаних коливань фундаментів запропоновані і досліджені нові конструктивні рішення, що полягають в приєднанні до фундаменту різними способами (через шарніри, жорсткі защемлення і пружні зв'язки) залізобетонних плит, розташованих на ґрунтовій основі.

Отримані рівняння спільних коливань такої системи підвалина-фундамент-приєднані плити (ПФПП), що уточнюють раніше отримані автором рішення. Розроблені алгоритми визначення частот власних амплітуд вимушених коливань такої системи. На основі теоретичних і експериментальних досліджень, що охоплюють широкий діапазон зміни параметрів системи, встановлені основні закономірності впливу плит на коливання фундаменту при різних вузлах зв'язку і оцінена відносна ефективність і область застосовності розглядуваних конструкцій. Запропоновані також спрощені розрахункові формули, що дозволяють підбирати необхідні параметри приєднаних плит для зниження рівня вібрацій фундаментів під машини, що створюють горизонтальні низькочастотні динамічні навантаження.

8. Розроблені розрахункові схеми фундаменту з приєднаними плитами, що враховують всі основні фактори (масу і жорсткість плит, жорсткісні і дисипативні характеристики підвалини і елементів зв'язку). Отримані диференціальні рівняння руху системи ПФПП як для жорстких плит, так і при врахуванні пружності останніх.

Складені практичні рекомендації по розрахунку параметрів приєднаних плит з умови зниження рівня вібрацій фундаменту. Успішний досвід застосування плит для зменшення коливань

фундаменту під енергообладнання підтвердив основне теоретичне положення про те, що за рахунок збільшення жорсткості системи приєднані плити можуть збільшувати демпфірування в системі ПФПП і використовуватися для відстройки від резонансу.

Результати досліджень по приєднаних плитах, як одному з ефективних конструктивних способів зниження вібрацій фундаментів машин з динамічними навантаженнями, знайшли відображення в підготовленому до видання проекті "Керівництва до БНіП 2.02. 05'-87" у вигляді самостійного розділу.

9. Запропонована і дослідно перевірена конструкція фундаменту з регульованими в процесі роботи параметрами, що дозволяє оперативнo, без зупинки машини, змінювати жорсткість зв'язку основного масиву з приєднаною плитою, істотно зменшувати (в 3 - 5 раз) амплітуди коливань фундаменту при перехідних режимах роботи машини і завдяки цьому відстроюватись від резонансної частоти.

10. Впровадження окремих положень виконаних досліджень здійснене на рівні БНіП 2.02.05.87 "Фундаменти машин з динамічними навантаженнями" (автор дисертації входить в число учасників колективу укладачів).

По темі дисертації під науковим керівництвом і при науковій консультації автора підготовлені і захищені дві кандидатські дисертації (Дем'яненко В. В. і Єрмолинський А. В.). Основний зміст дисертації відображений в 52 опублікованих роботах, частина з яких наведена нижче.

1. Седин В.Л. Развитие аналитических методов расчета фундаментов сложной формы для энергооборудования.- Днепропетровск, 1996 – 3.6 пл.

2. Швець Н.С., Седин В.Л., Киричек Ю.А. Конструктивные способы снижения вибраций фундаментов машин с динамическими нагрузками. -М.: Стройиздат, 1987.-152с. (Частка автора 35%, фундаменти з приєднаними плитами)

3. Седин В.Л. Колебания фундамента с учетом присоединенных плит // Основания и фундаменты. -К.:Будівельник. - 1979.- Вып.12.- С.75-79.

4. Седин В.Л. Колебания фундамента с присоединенными плитами // Основания и фундаменты. -К.:Будівельник. - 1981- Вып.14.- С.57-60.

5. Седин В.Л. Практические рекомендации к расчету параметров присоединенных плит //Динамика оснований, фундаментов и

подземных сооружений (Материалы Всесоюзной конференции, Ташкент, 8-10 декабря, 1981, т.1).- М.:НИИОСП.- 1981.- С.346-347.

6.Sedin V. Prigusenje vertikalnih vibracija kritih temelja dodatnim plocame // *Mehanica cvrstog deformabilnog tela* (XVI Yugoslovski kongres teorijske i primenjene mehanike. Becici, 1984).- 1984.- S.69-74.

7.Sedin V. Metode odredjivanja osobine tla pri dinamicckim opterecenjima // Там же. - S.561-568.

8.Седин В.Л. Определение динамических характеристик естественных оснований при малых статических давлениях // *Динамика оснований, фундаментов и подземных сооружений* (Труды VI Всесоюзной конференции, Нарва, 1985).- Л.: ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. - 1985. - С.267-269.

9.Sedin V. Analitic metod dinamicckoga progacuna temelja turboagregata // *Mehanica cvrstog deformabilnog tela* (XVII Yugoslovski kongres teorijske i primjene mehanike. Zadar, 1986). - Zadar: 1986.- S.309-315.

10.Седин В.Л. О расчете рамных и стенчатых фундаментов на широкополосные динамические возбуждения// *Проектирование и строительство энергетических объектов в сейсмических районах.* (Материалы Всесоюзного научно-технического совещания, Нарва, 1988).- Л.: ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. - 1990.- С.86-88.

11.Седин В.Л. Расчет перемещений куста свай, жестко соединенных с ростверком// *Механизированная безотходная технология возведения свайных фундаментов из свай заводской готовности* – Владивосток: 1988.- С.102-104.

12.Седин В.Л. К расчету стенчатых фундаментов с широкими стенками при помощи метода осреднения // *Сб.трудов Российской конференции по механике грунтов и фундаментостроению "Геотехника-95"*, т.3.- С.-Петербург: 1995.- С.558-592.

13.Седин В.Л. Асимптотическое исследование собственных колебаний стенчатых фундаментов // *Theoretical Foundations in Civil Engineering.*- Warsaw: 1997. - P.75-79.

14.Андрианов И.В., Ермолинский А.В., Седин В.Л. О предельных случаях в теории ребристых пластин// *Прикладная механика.* - 1991.- Т.27.- №7.-С.120-125 (Частка автора 33%, спільне теоретичне дослідження).

15.Андрианов И.В., Ермолинский А.В., Седин В.Л. О расчетах вертикальных колебаний стенчатого фундамента // *Динамика оснований и подземных сооружений* (Труды VII Всесоюзной конференции, Днепропетровск, 1989) - М.: НИИОСП.- 1989.- С.115-116 (Ча-

стка автора 33%, постановка задачі, спільне теоретичне рішення).

16. Андрианов И.В., Коношенко С.И., Седин В.Л. Расчет пластин с широкими ребрами // Прикладная механика. - 1995. - т.39. - №3. - С.75-84 (Частка автора 35%, постановка задачі, спільне теоретичне дослідження).

17. Андрианов И.В., Седин В.Л. К расчету современных конструкций рамных фундаментов // Изв. ВУЗов. Строительство и архитектура. - 1987. - №2. - С.15-18 (Частка автора 60%, постановка задачі, спільне рішення).

18. Andrianov I., Sedin V. Composition of simplified equations of nonlinear dynamics of plates and shallow shells on the basis of homogenization method// ZAMM. - 1988. - V.68. - N11. - P.573-575 (Частка автора 50%, спільне теоретичне дослідження).

19. Andrianov I., Sedin V. Simplified nonlinear equations of theory of plates and shells// Computer aided design and computer aided manufacturing (6th International symposium, Zagreb, Yugoslavia, 10-11 October 1984). - 1984. - P.207-211 (Частка автора 50%, спільне теоретичне дослідження).

20. Andrianov I., Sedin V. Turbogenerator foundation analysis under wide-range (seismic in particular) excitation// Int. Conference on Recent Advances in Geotechnics and Earthquake. Engn.. - 1991. - v.IV. 3. - P.1547-1551. (Частка автора 50%, спільне теоретичне дослідження).

21. Басий В.И., Ротгауз Б.А., Седин В.Л. Динамические исследования фундамента мощного энергоблока// Материалы конференций и совещаний по гидротехнике. - Л.: Энергоиздат. - 1982. - С.138-141 (Частка автора 33%, аналіз даних випробувань).

22. Демьяненко В.В., Седин В.Л. Аналитические исследования динамики стеновых фундаментов // II-я Украинская научно-техническая конференция по механике грунтов и фундаментостроению, т. II. - Полтава: 1995. - С.33-36 (Частка автора 60%, постановка задачі, теоретичне рішення)

23. Исследования колебаний фундаментов с присоединенными плитами при различных условиях связи /Седин В.Л., Швец Н.С., Андрианов И.В., Аграновский Г.Г.// Строит. механика и расчет сооружений. - 1982. - №2. - С.53-56 (Частка автора 50%, проведення експерименту, обробка і аналіз результатів)

24. Киричек Ю.А., Седин В.Л. Вибрационные испытания фундамента под турбоагрегат мощностью 800 МВт // Основания и фундаменты. - К.: Будівельник. - 1986. - Вып. 19. - С.24-26 (Частка ав-

тора 50%, проведення експерименту, обробка і аналіз результатів)

25. Седин В.Л., Демьяненко В.В. Аналитический метод исследования вынужденных колебаний стенчатого фундамента // Theoretical Foundations in Civil Engineering.- Warsaw: 1995. - P. 63-65 (Частка автора 60%, постановка задачі і теоретичне рішення)

26. Швец Н.С., Седин В.Л., Киричек Ю.А. Усиление фундаментов под машины с динамическими нагрузками// Международный симпозиум. Ленинград, 22-27 мая 1989.- Л.: Стройиздат. - 1989. - С.333-341 (Частка автора 33%, підсилення приєднаними плитами).

27. Svec N., Sedin V. Karakteristicne greske rod proektiraja i eksploanacije temelja strojeva// Saopcenja I savjetovanja drustva za mehaniku tla itemeljenje Hrvatska (Opatija, 1989). - Zagreb: 1989.- S: 467-471 (Частка автора 50%, постановка задачі, аналіз і обміркування отриманих результатів, практичні висновки).

28. А.с. 947291 СССР, МКИ Е 02 D 27/44. Фундаменты под машины / В.Л.Седин, Ю.Г.Креймер, И.А.Карновский, М.П.Захваткин, (СССР). - №3249470/29-33; Заявлено 13.02.81; Опубл. 30.07.82, Бюл. №28. - 2с. (Частка автора 25%, конструкція і її практичне та теоретичне обґрунтування).

Седин В.Л. Методи розрахунку і нові рішення фундаментів складної форми при динамічних впливах.-Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.23.02 - підвалини та фундаменти. - Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, м. Дніпропетровськ, 1997.

У роботі висвітлено результати: дано аналіз натурних динамічних дослідів системи турбоагрегат - фундамент - підвалини, проведених для головних енергоблоків потужністю 1000 МВт на АЕС, що будуються в різних ґрунтових умовах. Запропоновано і реалізовано алгоритми аналітичного розрахунку динамічного напруженого стану, вільних і вимушених коливань, складних просторових конструкцій фундаментів на пружних і пружно-в'язких основах. Зіставлення експериментальних і розрахункових даних підтверджує доцільність практичного використання

розглянутих методів динамічного розрахунку фундаментів турбоагрегатів.

Запропоновано і реалізовано рішення нових фундаментів під машини з динамічними впливами, які дозволяють істотно знижувати рівень вібрацій у системі “агрегат - фундамент - підвалини”.

Ключові слова: підвалини, фундамент, турбоагрегат, натурний експеримент, усереднення, асимптотика, динаміка, зниження вібрацій.

Седин В.Л. Методы расчета и новые решения фундаментов сложной формы при динамических воздействиях. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.23.02 - основания и фундаменты. - Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, Днепропетровск, 1997.

В работе освещены результаты и дан анализ натуральных динамических исследований системы турбоагрегат - фундамент - основание, проведенные для головных энергоблоков мощностью 1000 Мвт на строящихся в различных грунтовых условиях АЭС. Предложены и реализованы алгоритмы аналитического расчета динамического напряженного состояния, свободных и вынужденных колебаний сложных пространственных конструкций фундаментов на упругом и упруго-вязком основаниях. Сопоставление экспериментальных и расчетных данных подтверждает целесообразность практического использования рассмотренных методов динамического расчета фундаментов турбоагрегатив.

Предложенные и реализованные решения новых фундаментов под машины с динамическими воздействиями, позволяющие существенно снижать уровень вибраций в системе “агрегат - фундамент - основание”.

Ключевые слова: фундамент, основание, турбоагрегат, натурный эксперимент, осреднение, асимптотика, динамика, снижение вибраций.

Sedin V. Methods of Analysis and New Solutions for Complicated Foundations under Dynamical Loading.-Manuscript.

Thesis for a doctor's degree by speciality 05.23.02 - foundations and basements. - Pridneprovsky State Academy of Civil Engineering and Architecture, Dnepropetrovsk, 1997.

Natural dynamical research of a system turbogenerator - basement - foundation for 1000 MW power blocks on built in various geological environment for nuclear power station, showed general characteristics of its dynamical behaviour for various constructive shemes and ground conditions. Algorithms for analytical study of dynamical stress state, natural and forced oscillations of complicated 3D structures on the elastic and visco-elastic foundation are realized. Comparison of experimental and theoretical dates shows the practical value of the proposed for turbogenerator foundation dynamical research.

New engineering solutions for foundations with dynamical loading were proposed and realized, that gives possibility to decrease level of vibrations of a system "aggregate - foundation - basement".

Key words: basement, foundation, turbogenerator, field experiment, homogenization, asymptotics, dynamics, suppression of vibrations.

Подп. в печать 09.09.97	Формат 70x180/32.
Объем 1,8 печ. л.	Уч.-изд. л. 2.2
Тираж 100 экз.	Заказ № 121

Цена договорная

Редакционно-издательский отдел.
Приднепровская государственная академия
строительства и архитектуры.
г. Днепропетровск.

AB 38.571