

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**КОЖУШКО АНДРІЙ ПАВЛОВИЧ**

УДК 629.1.02

**ДИНАМІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА МЕТОДИ ПОЛІПШЕННЯ ПЛАВНОСТІ  
ХОДУ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ  
РІДКИХ ВАНТАЖІВ**

Спеціальність 05.22.02 – автомобілі та трактори

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Харків – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі автомобіле- і тракторобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант** доктор технічних наук, професор,  
Заслужений діяч науки і техніки України  
**Кальченко Борис Іванович**,  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
професор кафедри автомобіле- і тракторобудування

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, доцент  
**Шуляк Михайло Леонідович**,  
Харківський національний технічний університет  
сільського господарства імені Петра Василенка,  
завідувач кафедри трактори і автомобілі;

доктор технічних наук, доцент  
**Макаров Володимир Андрійович**,  
Вінницький національний технічний університет,  
професор кафедри автомобілів та транспортного  
менеджменту;

доктор технічних наук, професор  
**Кайдалов Руслан Олегович**,  
Національна академія Національної гвардії України,  
начальник кафедри оперативного та логістичного  
забезпечення.

Захист відбудеться «13» травня 2021 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.13 при Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розісланий «06» квітня 2021 р.

В.о. вченого секретаря  
спеціалізованої вченої ради



В.В. Дущенко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження.** Використання колісних тракторів при виконанні транспортних робіт в агропромисловому комплексі держави доволі поширене. Це обумовлено різноманітністю виконання ними сільськогосподарських робіт. До складу транспортних робіт в будь-якому господарстві входять перевезення рідких вантажів тракторними цистернами. Ці цистерни, на відмінність від автомобільних, не мають внутрішніх перегородок (герметичних і негерметичних), сіток та інших перешкод перетіканню рідини всередині цистерни. Така конструктивна особливість зумовлена меншою транспортною швидкістю тракторних перевезень, ніж автомобільних, а також специфікою рідкого вантажу.

На теперішній час, в умовах постійного нарощування енергонасиченості тракторних агрегатів, транспортна швидкість та вантажопідйомність машинно-тракторного агрегату (МТА) підвищується. Внаслідок збільшення енергії коливань рідкого вантажу підвищується вірогідність виникнення аварійних ситуацій при транспортуванні цистерн (перекидання, складування, галопування агрегату). Значний вплив на динамічні показники руху здійснюють коливання вільної поверхні рідини, які в комплексі з вимушеними коливаннями транспортного засобу суттєво впливають й на ергономіку. Зауважимо, що штучні обмеження швидкості в такому випадку не доцільні, адже це призведе до зниження продуктивності МТА. Трактор є багатофункціональним засобом, тому безпеку його руху доцільно забезпечувати параметрами транспортованої причіпної цистерни (ПЦ) або напівпричіпної цистерни (НПЦ).

Актуальним є комплексний підхід до покращення плавності ходу та динамічної навантаженості на ходову систему колісних тракторів при виконанні транспортних робіт з цистернами, що мають вільну поверхню. Дослідження в даному напрямку регламентовані паспортом спеціальності 05.22.02 – автомобілі та трактори.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана відповідно до постанови Закону України «Про стимулювання розвитку вітчизняного машинобудування для агропромислового комплексу» № 3023-III від 07.02.2002 р. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі автомобіле- і тракторобудування НТУ «ХПІ» у рамках завдань держбюджетної НДР МОН України «Концепція формування характеристик перспективних транспортних енергетичних установок (на прикладі танкової енергетичної установки з дизелем та безступінчастою трансмісією)» (ДР № 0116U000854, 2016-2018 рр.), а також госпдоговору «Розробка рекомендацій по вибору параметрів ходової системи і системи підресорювання кабіни трактора» (договір № 26999, 2020 р, ГА «Інжиніринг»), де здобувач був керівником теми.

**Мета та задачі дослідження.** Метою дослідження є поліпшення показників плавності ходу та динамічної навантаженості на ходову систему колісних тракторів при транспортуванні рідини в цистернах сільськогосподарського призначення за рахунок визначення раціональних схем та параметрів конс-

трукції МТА.

Для досягнення мети вирішувалися наступні задачі:

- виконати аналіз динамічних властивостей руху МТА для перевезення рідкого вантажу з вільною поверхнею рідини у цистерні та визначити перспективні напрями їх поліпшення;
- сформувати методологічний підхід до поліпшення динамічних властивостей складної механічної системи «трактор – цистерна» та підтвердити його методами експериментальної перевірки;
- запропонувати концепцію визначення параметрів вільних коливань на базі лінеаризованої моделі МТА та провести аналіз коливальної системи колісного трактора з тракторними цистернами різного типу;
- скласти уточнені нелінійні моделі прямолінійного руху системи «трактор – цистерна», на основі яких виявити та проаналізувати вплив експлуатаційних чинників на динаміку руху та коливання колісного трактора;
- виконати експериментальні дослідження по оцінці динамічних властивостей колісних тракторів при транспортуванні рідкого вантажу, що має вільну поверхню, та здійснити апробацію розроблених математичних моделей;
- провести теоретичне дослідження, запропонувати раціональні схеми і параметри конструкції МТА та надати практичні рекомендації для покращення плавності ходу та динамічної навантаженості ходової системи колісних тракторів на транспортних роботах з перевезення рідкого вантажу.

*Об'єкт дослідження* – динамічні процеси колісних тракторів при транспортуванні рідкого вантажу в цистерні сільськогосподарського призначення.

*Предмет дослідження* – взаємозв'язки динамічних показників коливальних процесів колісних тракторів з динамікою руху рідкого вантажу при транспортуванні.

**Методи дослідження:** при визначенні наукової проблеми використані методи порівнянь та аналогій; при створенні математичних моделей руху колісного трактора з цистернами застосовано основні положення теорії коливань, зокрема методи лінеаризації та матричного спектрального аналізу; для моделювання коливань рідини використані методи гідродинаміки та математичної фізики: потенціалів, парціальних осциляторів, розкладання в узагальнений ряд Фур'є по власних формах; для інтегрування рівнянь математичних моделей динаміки руху МТА застосовано модифікований метод Ейлера; для апробації результатів математичного моделювання використаний аналіз натурних випробувань в ході експериментальних досліджень трактора з цистерною, а також статистичний метод для визначення розбіжностей при порівнянні результатів теоретичних та експериментальних досліджень.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в розвитку та узагальненні існуючої теорії коливань колісного трактора з цистерною для транспортування рідини, яка має вільну поверхню, що дає змогу вирішити актуальну наукову проблему поліпшення плавності ходу та динамічної навантаженості на ходову систему колісних тракторів шляхом визначення раціональних схем та параметрів конструкції МТА для зменшення негативного впливу низькоча-

стотних коливань поверхневого шару рідини у цистерні.

При цьому *вперше*:

- встановлено взаємозв'язок між рівнем наповненості тракторної цистерни та власними частотами повздовжніх, поперечних та обертових (кутових) коливань рідини, що дало змогу спростити модель вимушених коливань;

- встановлено умови виникнення пов'язаних коливань найбільшої (квазі-резонансної) амплітуди, які залежать від рівня рідини в цистерні та сили тяги трактора, що дало змогу об'єднати маси елементів при динамічному аналізі МТА;

- досліджено умови виникнення параметричних пов'язаних коливань в МТА при транспортуванні рідкого вантажу, що дало змогу надати рекомендації щодо параметрів конструкції для забезпечення стійкого руху;

- виявлено вплив перерозподілу мас рідини в цистерні на показники плавності ходу колісного трактора та динамічної навантаженості ходової системи трактора, НПЦ та ПЦ, що дало змогу надати рекомендації щодо вибору параметрів налаштування МТА (тиск в шинах, баластування, тощо).

*Отримали подальший розвиток:*

- математичні моделі пов'язаних коливань колісного трактора з причіпною та напівпричіпною цистернами, які відрізняються від існуючих врахуванням перерозподілу рідини шляхом використання диференціальних рівнянь для поверхневих хвиль Релея, що дало змогу врахувати поздовжні та поперечні коливання рідини в цистерні;

- математична модель кінематичного збудження коливань, в якій, на відміну від відомих функцій профілю дорожньої поверхні, використано дві гармоніки різної частоти, що дало змогу одночасно враховувати макро- та мікропрофіль нерівності;

- математичні моделі парціальних осциляторів для розрахунку коливань рідини в цистерні, які відрізняються врахуванням місцевого опору при повороті рідини у стінок ємності, що дало змогу моделювати високоамплітудні коливання під час розвитку параметричного резонансу в МТА.

### **Практична значимість отриманих результатів.**

Основна практична цінність отриманих результатів полягає у наступному:

- встановленні пружні і дисипативні характеристики підвіски цистерни, які зменшують амплітуди динамічної навантаженості ходової системи;

- для колісних тракторів компоновки 4К4б рекомендовано при транспортуванні НПЦ з вільною поверхнею рідини застосовувати баластні вантажі для непідресорених мас трактора, що забезпечує зниження вертикальних прискорень на сидінні оператора-водія на величину до 9%;

- при транспортуванні НПЦ трактором компоновки 4К4б рекомендовано зменшувати тиск у тракторних шинах, що призводить до зменшення вертикальних прискорень на сидінні оператора-водія в зоні резонансних коливань остова трактора на 6,6% при русі по асфальтобетонній дорозі та на 12,8% при русі по ґрунтовій дорозі;

- для забезпечення стійкості від параметричного резонансу після напов-

нення цистерни рідиною рекомендовано щоб додаткове значення сумарної деформації підвіски і шин не перевищувало 10% від поперечного розміру (діаметру) цистерни.

Основні наукові положення, що виносяться на захист:

1. Розроблено метод та алгоритми розрахунку низькочастотних коливань рідини в тракторних цистернах, які є універсальними щодо форми циліндричної ємності, простими при використанні й сумісними до дискретної структури будь-яких методів динамічного аналізу та синтезу транспортних засобів, що застосовуються для перевезення рідини, яка має вільну поверхню.

2. Розроблено метод і алгоритм розрахунку карти низьких частот та відповідних декрементів загасання вільних коливань в елементах трактора та цистерни, що дало змогу виконувати науково-обґрунтований вибір заходів щодо захисту оператора-водія від шкідливого впливу коливань, а інших елементів МТА – від резонансів.

3. Розроблено нову методологію комплексного розрахункового дослідження характеристик руху трактора з цистерною в найбільш несприятливих умовах експлуатації, які зумовлюють розвиток резонансних явищ, що призводять до автоколивань високої амплітуди. Ця методологія передбачає:

- моделювання руху трактора на сталій швидкості, що є максимальною при обраному рівні рідини у цистерні та якості дорожнього покриття;

- визначення рівня рідини у цистерні за умови наближення частоти вільних коливань рідини до однієї з низьких частот вільних коливань мас МТА (для відтворення розвитку внутрішнього резонансу) або до половинної частоти вільних вертикальних коливань підвіски цистерни (для відтворення розвитку основного параметричного резонансу);

- встановлення довжини хвилі мікропрофілю дорожнього покриття за умови наближення частоти кінематичного збурення до власної частоти поверхневого шару рідини, що утворює внутрішній або параметричний резонанс;

- визначення амплітуди мікропрофілю відповідно до якості покриття дороги та дослідження впливу цього параметру на інтенсивність розвитку резонансу;

- ідентифікацію найбільш припустимого значення кута нахилу шляху, що визначає початок розвитку галопуючого резонансу.

За результатами комплексного дослідження, яке розкриває повну картину динамічних явищ під час сталого руху МТА, розробляються рекомендації щодо відстроювання від резонансів та зменшення дії інших чинників, які створюють негативний вплив на процеси транспортування рідини у цистерні.

Запропоновані в дисертації основні наукові положення, розробки і рекомендації впроваджені:

- на ПАТ «Харківський тракторний завод» при розробці нової та модернізації старої тракторної техніки стосовно підвищення динамічних показників руху колісного трактора з тракторною цистерною; на ГА «Інжиніринг» при розробці нової моделі трактора ХТЗ-160У стосовно вибору параметрів ходової системи і системи підресорювання кабіни трактора; на ПрАТ «АвтоКрАЗ»

стосовно поліпшення динамічних навантаження на ходову систему транспортного засобу при перевезенні рідини; у Харківській філії УкрНДПВТ ім. Л. Погорілого в практиці проведення випробувальних робіт тракторів та сільськогосподарської техніки при державних приймальних випробуваннях; на ПрАТ «Кредмаш» стосовно підвищення технічного рівня виробництва цистерн (ємностей), які використовуються на автомобільній та тракторній техніці; на ТОВ «Українське конструкторське бюро трансмісій і шасі» стосовно підвищення динамічних властивостей колісних тракторів при транспортуванні агрегатів перемінної маси;

– у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» в навчальному процесі підготовки бакалаврів та магістрів.

**Особистий внесок здобувача.** Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. Серед них: розробка методології поліпшення динамічних властивостей руху колісних тракторів при транспортуванні цистерн, що мають вільну поверхню рідини; розробка та експериментальне підтвердження моделі парціальних осциляторів для розрахунку коливань рідини в цистерні, яка ґрунтується на еквівалентній заміні форми ємності; виявлення впливу рівня наповненості цистерни рідиною на коливальні процеси при русі МТА; розробка лінеаризованої моделі коливань колісного трактора з ПЦ і НПЦ; виокремлення пов'язаних коливань колісного трактора та цистерн, які містять найбільші (квазірезонансні) амплітуди; виявлення спектральних ефектів, які розширюють теорію коливань складних систем; розробка нелінійної моделі пов'язаних коливань МТА з урахуванням перерозподілу рідини в цистерні; методи тестування динамічних показників при прямолінійному русі МТА з цистернами; ідентифікація параметричних коливань МТА при перевезенні рідкого вантажу; практичні рекомендації щодо зменшення негативного впливу низькочастотних коливань поверхневого шару рідини у цистерні на показники плавності ходу трактора.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертації доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на наукових конференціях «Science, research, development #11. Technics and technology» (Польща, м. Варшава 2018 р.); «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2019 р. – 2020 р.); «Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2019» (м. Чернігів, 2019 р.); «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація» (м. Харків, 2019 р.); «Technical sciences: history, the present time, the future, EU experience» (Польща, м.Влоцлавек 2019 р.); «Проблеми надійності машин», присвяченої пам'яті академіка В.Я. Аніловича (м. Харків, 2019 р.); «Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions» (Естонія, м. Таллінн 2019 р.); «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (м. Харків, 2020 р.); «Експлуатаційна та сервісна інженерія» (м. Харків, 2020 р.). Працюючи над дисертацією, здобувач став Лауреатом стипендії Кабінету Міністрів України для молодих вчених НТУ «ХП» (2018 – 2020 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 40 наукових працях, у тому числі: 1 колективна монографія; 1 одноосібний навчальний посібник; 28 наукових статей, з яких 26 статі у наукових фахових виданнях України, 2 у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз (з них 1 у закордонному науковому періодичному виданні [23], що індексується у Scopus з кварталом Q2); 8 тез у збірниках доповідей наукових конференцій; 2 патенти України на корисну модель.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертаційна робота складається з анотацій двома мовами, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Повний обсяг роботи складає 376 сторінки, основний текст – 280 сторінок. Робота ілюстрована 26 рисунками на окремих сторінках та 104 рисунками по тексту, наведено 10 таблиць на окремих сторінках та 28 таблиць по тексту. Додатки розміщено на 36 сторінках. Перелік використаних літературних джерел складається із 333 найменувань на 40 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** наведено загальну характеристику роботи; обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи; сформульовано мету, задачі, об'єкт та предмет дослідження; описані основні методи дослідження та зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами; викладені положення, що визначають наукову новизну та практичне значення роботи; надано інформацію про апробацію та публікацію результатів дисертаційних досліджень.

**У першому розділі** виконано аналіз перспективних напрямків дослідження з поліпшення динамічних властивостей колісних тракторів при перевезення рідкого вантажу з вільною поверхнею рідини у цистерні сільськогосподарського призначення. Проведено аналіз розподілу сільськогосподарських робіт, які виконує колісний трактор. Наведено передумови до залучення колісних тракторів на транспортних роботах в агропромисловому комплексі.

Проводячи аналіз існуючої науково-технічної літератури, яка виокремлює тенденції залучення тракторної техніки до виконання транспортних робіт, відмічено наступні аспекти, що впливають на динаміку руху МТА:

- створення колісних тракторів тягово-енергетичної концепції з метою збільшення продуктивності, що сприяє підвищенню транспортної швидкості;
- задля задоволення тягових властивостей виробники агротехнічної техніки збільшують вантажопідйомність транспортованих агрегатів;
- відсутність перешкоджаючих факторів (внутрішніх перегородок, сіток та інш.) руху рідини в цистернах сільськогосподарського призначення, що спричиняє погіршення динамічних властивостей руху.

Обчислення динамічних характеристик об'єкта з рухливою масою в'язкої нестискуваної рідини в ємності носить велику практичну значимість, тому створення нових або модернізація вже існуючих розрахункових методів продовжується і сьогодні. Вирішення зазначеної проблеми зведено до визначення властивостей рідкого вантажу, який рухається з плином часу. Існує декілька

засобів для вирішення задач з дослідження руху рідини: модель ідеальної нестискуваної рідини (*рівняння Ейлера*); квазігідродинамічні моделі; модель в'язкої нестискуваної рідини (*рівняння Нав'є – Стокса*), та інші. Бурхливий розвиток сучасних математичних моделей дозволив використовувати складні методи розрахунку: метод «штучної стискуваності», метод часток в осередку, метод розщеплення, метод кінцевих елементів, тощо. Зазначені методи з високим рівнем точності описують рух в'язкої нестискуваної рідини в ємності, проте вони призводять до ускладнення розрахункових алгоритмів і труднощів їх реалізації у рамках загальної моделі транспортного засобу. Тому в задачах проектування тракторних цистерн доцільним є використання комбінованої моделі класичного типу, яка об'єднує рівняння Нав'є – Стокса з *рівняннями поверхневих хвиль Релея* та *теорією потенціалів Жуковського*. Такий підхід ґрунтується на *потенціальній постановці задачі*, при якій коливальний рух рідини (за виключенням вузького пристінного шару) вважався безвихровим, та використовується *метод парціальних осциляторів*, який дозволив для низькочастотних коливань замінити континуальну модель рідини дискретною моделлю. Метод парціальних осциляторів описано в роботах К.С.Колеснікова, Г.Н.Мікішева, Н.Н.Моїсеєва, А.А.Петрова, Б.Г.Рабіновича, В.Г.Сухореброго, де він застосовується для розрахунків паливних баків ракет. Проте умови, при яких розвиваються коливання рідини у тракторній цистерні, суттєво відрізняються від тих, що спостерігаються при старті ракети, тому цей метод потребує значної переробки та адаптації до нових задач.

Характер зміни динамічного стану такого об'єкту, як трактор, відображується у різноманітних коливальних явищах, що виникають в складній механічній системі. Єдиний чинник, який характеризує динамічні властивості руху будь-якої системи – це коливання (вільні, вимушені, автоколивання та параметричні). Показово, що під час руху трактора з цистерною в різних частинах МТА спостерігаються всі зазначені види механічних коливань.

Загальний принцип вивчення *вільних коливань* системи зводиться до рішення системи лінійних однорідних диференціальних рівнянь багатомасових моделей аналітичним, чисельним та ін. методами. Великого розповсюдження набули рекурентні методи Толле, Терських, Хольцера. При описі в'язкопружних середовищ в контексті розгляду лінійних задач відомими є моделі Кельвіна – Фойгта, Максвелла та стандартного лінійного тіла. Широкого загалу набув матричний чисельно-аналітичний метод інтегрування рівнянь руху механічної системи із зосередженими параметрами. Окреслений метод дозволяє представити загальні рішення задачі Коші у вигляді лінійної форми з матричними коефіцієнтами. При дослідженні коливань гідромеханічних вузлів встановлено переваги застосування схем Адамса при розрахунку вузлів, які описуються жорсткою системою диференціальних рівнянь. Вільні коливання в системах трактора передусім досліджуються при розгляді моторно-трансмісійної установки та при дослідженні руху підресорених мас трактора. Ці дослідження направлені на визначення базових частот, які впливають на особливості конструкції трактора та/або стан водія. Не вирішеною за-

лишається проблема визначення впливу гідромеханічних коливань цистерни (яка має вільну поверхню рідини) на механічні коливання трактора.

Вплив *вимушених коливань* вважають основоположним при дослідженні динаміки руху трактора. Утворення зовнішньої сили здійснює позитивну роботу та забезпечує додатковий енергетичний вплив на загальну коливальну систему. Збурювальні зовнішні сили діють на трактор за рахунок утворення сил при русі по складному мікропрофілю поверхні та врахуванні сил, які утворюються при транспортуванні агрегатів (тобто при впливі гакового навантаження). Дослідження впливу цього навантаження, що утворюється поступовою зміною масово-інерційних складових транспортованого агрегату, не нове. Проте не вирішеною проблемою залишається утворення додаткових збурюючих чинників, які виникають при перевезенні рідкого вантажу в сільськогосподарських цистернах, що мають вільну поверхню рідини. Адже врахування складного руху поверхневого шару рідини в цистерні, як це прийнято вважати з наявного досвіду, підвищить негативні динамічні збурення МТА.

Дослідження інших видів коливань (*автоколивань* та *параметричних*) за характером взаємодії з навколишнім середовищем зводиться до дослідження стійкості руху транспортного засобу. Великий вклад в дослідження *автоколивань транспортного засобу* в умовах стійкого руху внесли Д.А. Антонов, Г.В. Аронович, Б.Л. Бидерман, В.О. Богомоллов, В.В. Болотін, А.Г. Болдирєв, В.П. Волков, Б.Г. Галеркін, Г.А. Гаспарянц, Б.А. Глух, В.А. Горелов, А.А. Загордан, Я.Х. Закін, М.В. Келдиш, Д.М. Клец, К.С. Колесніков, М.Г. Крейн, В.І. Крилов, А.М. Ляпунов, Я.М. Певзнер, М.А. Подригало, В.В. Редчиц, И. Рокар, В.П. Сахно, Г.А. Смирнов, А.В. Смирчек, С.П. Тимошенко, Е.А. Чудаков, Б.М. Шифрин, Г. Шмідт, N.M. Beliaev, F. Bloch, G. Broulhiet, R. Dietrich, H. Fromm, J.H. Greidanus, G. Hill, R.A. Ibrahim, F. Melde, D.T. Mook, H.B. Pacejka, G.I. Simitzes, V. Von Schlippe, та ін. Автоколивання, по своїй природі, схожі на вимушені коливання, які викликані періодичним зовнішнім впливом. Проте частота вимушених коливань дорівнює частоті зовнішнього впливу, а у автоколивання частота визначаються за внутрішніми властивостями системи. Зокрема, при автоколиваннях, які виникають на ґрунті основного параметричного резонансу, частота менша за частоту впливу у два рази. Розгляд параметричних коливань проводиться на основі дослідження стійкості параметричних резонансів, тобто при аналізі значно нелінійної системи диференціальних рівнянь. Аналіз динамічної стійкості систем при параметричних збудженнях в основному зводиться до вирішення *рівнянь типу Мат'є – Хілла*, або використанні *методів Галеркіна, Ляпунова, Болотного*, та ін. Отже, з аналізу наукової літератури, не відомою залишається проблема ідентифікації виникнення *автоколивань* або *параметричних* коливань в системі «трактор – цистерна», які впливають на показники стійкості транспортного засобу.

Дослідженням динаміки трактора (або мобільної машини) почали займатися з моменту зародження галузі тракторобудування, їй присвячено чисельні праці Є.Є. Александрова, В.Я. Аніловича, В.І. Анохіна, І.І. Артболецького, М.П. Артьомова, І.Б. Барського, В.О. Богомоллова, В.М. Болтинського,

П.М. Василенка, В.Л. Вейца, В.М. Великодного, А.І. Гришкевича, Б.І. Кальченка, Д.К. Карельського, В.В. Кацигіна, Ю.К. Кіртбая, І.П. Ксеневича, А.Т. Лебедева, Є.Д. Львова, А.В. Ніколаєнка, Л.В. Погорілого, М.А. Подригала, О.С. Полянського, А.В. Рославцева, В.Б. Самородова, В.П. Сахна, В.Л. Строкова, І.І. Трепененкова, А.М. Туренка, Д.А. Чудакова, В.М. Шаріпова, І.Г. Шепеленка, М.М. Щукіна, та ін. вчених, де використовуються класичні методи механіки, які позбавлені можливості врахування перерозподілу мас в сільськогосподарській цистерні, що викликані рухом рідини.

Аналіз відомих наукових робіт з поліпшення плавності ходу колісних тракторів при транспортуванні рідини з вільною поверхнею показав, що загальні принципи визначення складових динаміки руху такого об'єкту не систематизовані. Напрямок дослідження визначає необхідність розробки концептуального підходу з формування методу динамічного аналізу показників трактора при перевезенні рідкого вантажу з вільною поверхнею, що базується на дослідженні коливального руху складної системи «трактор – цистерна».

**Другий розділ** присвячено формуванню методології визначення коливального руху рідини в ємності з вільною поверхнею. Формалізовано фізичну модель збудження поверхневих коливань рідини; визначено групи та форми низькочастотних коливань рідини в ємності з вільною поверхнею; експериментально досліджено частоти і декременти загасання коливань. Розвиток методології визначення коливального руху рідини в ємності з вільною поверхнею направлено на здійснення якісного аналізу динамічних властивостей складної механічної системи «трактор – цистерна». Відомо, що у випадку, коли рідина заповнює усю ємність, на її рухи суттєво впливають зміни тиску і щільності внаслідок стиснення, що приводить до коливань високої частоти. Проте, при наявності у горизонтальній ємності вільної поверхні (рис. 1) на перший план виходять поверхневі коливання низької частоти, при яких щільність рідини залишається незмінною. Вони описуються системою векторних рівнянь Нав'є-Стокса, яка враховує внутрішнє тертя, пропорційне в'язкості:

$$\left\{ \rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} \right) = -\text{grad } p - \rho \cdot v \cdot \text{rot rot } \vec{V}; \text{div } \vec{V} = 0, \right. \quad (1)$$

де  $\vec{V} = \{V_x, V_y, V_z\}$ ,  $p$ ,  $\rho$  – швидкість, коливання тиску, щільність рідини;  $v$  – її кінематична в'язкість;  $t$  – час; *конвективні складові* є малими, й їх відкинуто.

Якщо пружністю бічних стінок припустимо знехтувати, то рівняння (1) доповнюються умовою *не проникнення* на змочуваній поверхні  $\Gamma$  і *динамічною умовою Релея* на вільній поверхні  $\Gamma_0$ :

$$\left\{ \frac{\partial \vec{V}}{\partial \vec{n}} = \frac{\partial \vec{V}_{cm}}{\partial \vec{n}}, \vec{n} \perp \Gamma; \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \text{grad} \left( g \int V_y dt \right) \Big|_{\Gamma_0} = 0, \right. \quad (2)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння.

Довільне рішення задачі (1), (2) розкладається в ряд по власним формам, які відповідають рухові так званих *парціальних* (взаємно проникливих) прошарків рідини. Квазістаціонарний прошарок рухається синхронно зі стінками, а всі інші – коливаються відносно нього (і стінок). Для рідин малої в'язкості, які, зазвичай, перевозяться тракторними цистернами, за межами тонкого при-

стіночного шару вихровою компонентою руху можна знехтувати, і крайова задача (1), (2) набуває вигляду

$$\left\{ \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -\text{grad } p - f \cdot (\vec{V} - \vec{V}_{cm}^{\perp}); \frac{\partial \vec{V}}{\partial \vec{n}} = \frac{\partial \vec{V}_{cm}}{\partial \vec{n}} \Big|_{\Gamma}; \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \text{grad}(g \int V_y dt) \Big|_{\Gamma_0} = 0, \right. \quad (3)$$

де  $f$  – це коефіцієнт сили зовнішнього тертя; у внутрішні частини ємності ця сила передається через квазістаціонарний прошарок;  $\vec{V}_{cm}^{\perp}$  – тангенціальна швидкість бокової стінки (вона лежить у площині плоского ядра потоку).

Для цистерни малого розміру в динамічній умові Релея доцільно врахувати силу поверхневого натягу, яка є пропорційною повній кривизні вільної поверхні та коефіцієнтові поверхневого натягу  $\sigma$ . На рис. 1 показано, що вісь  $Ox$  розташовано на початковому рівні вільної поверхні рідини. Збуджувачем вільних коливань низької частоти (і трансформатором вимушених коливань) виступає вільна поверхня рідини. Фронти і хвилі кінематичного збурення поширюються по рідині від бокових поверхонь цистерни та приводять до підйому (опусканню) рівня вільної поверхні. Тому, в протилежній фазі до швидкості вертикального зміщення поверхні змінюється величина тиску, спричиненого гравітаційними силами та силами поверхневого натягу, що приводить до вільних коливань, амплітуда яких зменшується при зростанні глибини за експоненціальним законом. Розглядається *потенціальна постановка задачі*, в якій вихрова складова поля відсутня, і швидкість  $\vec{V} = \text{grad} \phi$ . Щоб уникнути розгляду інтегро-диференціального рівняння, замість потенціалу  $\phi$  для швидкостей введено скалярний потенціал  $\Phi$  для зміщення рідини у поверхневих хвилях Релея. Тоді на змоченій поверхні  $\Gamma$  тиск  $p$  є довільним (рис. 2), а на початковому рівні вільної поверхні  $\Gamma_0$  його значення розраховується так:

$$p = \rho \cdot g \cdot \Delta y_n - \sigma \cdot \left[ \partial^2 \Delta y_n / \partial x^2 + \partial^2 \Delta y_n / \partial z^2 \right]; \Delta y_n = \partial \Phi / \partial y; \Phi = \int (\phi - \phi_{cm}) dt, \quad (4)$$

де  $\Delta y_n$  – локальний підйом вільної поверхні від її начального положення.

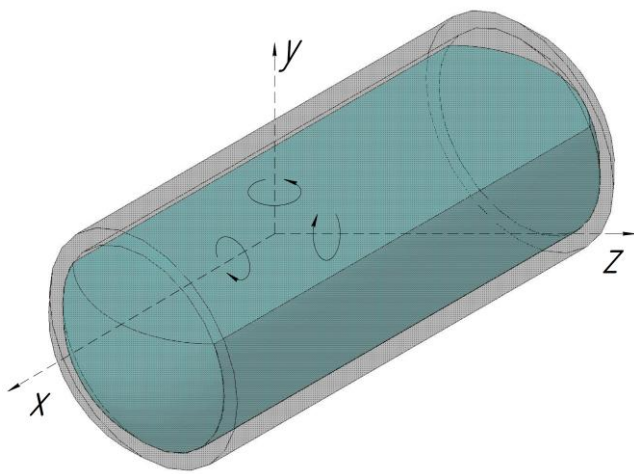


Рисунок 1 – Реальна форма тракторної цистерни

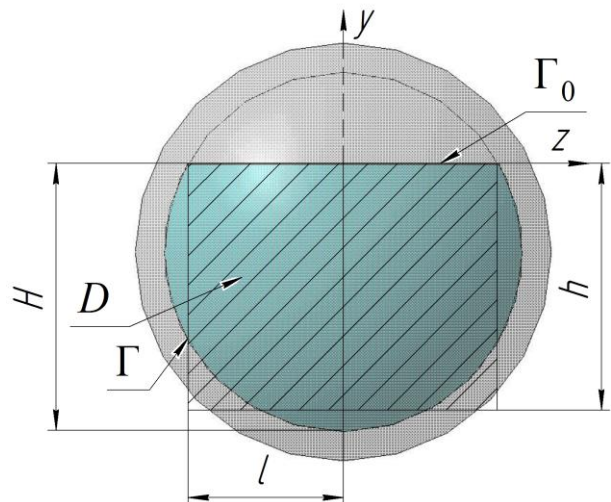


Рисунок 2 – Поперечні перерізи цистерни та розрахункової ємності

Потенціал  $\Phi$  задовольняє рівнянню Лапласа та однорідним крайовим умовам на стінках цистерни:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = 0; \quad \left. \frac{\partial \Phi}{\partial \vec{n}} \right|_{\Gamma} = 0. \quad (5)$$

Якщо цистерна рухається поступально вздовж вісі  $Oz$ , то на вільній поверхні отримаємо наступне рівняння коливань для потенціалу

$$\ddot{\Phi} + f \cdot \dot{\Phi} + g \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \frac{\sigma}{\rho} \cdot \frac{\partial^3 \Phi}{\partial y^3} \Big|_{\Gamma_0} = \ddot{\Phi}_{cm}, \quad (6)$$

де  $\text{grad} \dot{\Phi}_{cm} = -\vec{V}_{cm}$ , тобто  $\ddot{\Phi}_{cm} = a_{cm,z}(t)z$ ,  $a_{cm,z}$  – це курсове прискорення. Для поступального та кутового руху оболонки права частина враховує кути нахилу  $\theta_{cm,x}(t)$ ,  $\theta_{cm,z}(t)$  вектора сили тяжіння відносно вільної поверхні:

$$\ddot{\Phi} + f \cdot \dot{\Phi} + g \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \frac{\sigma}{\rho} \cdot \left[ \frac{\partial^3 \Phi}{\partial y^3} \right] \Big|_{\Gamma} = \begin{cases} -[a_{cm,z}(t) + g \cdot \theta_{cm,x}(t)] \cdot z, \text{ пл. } zOy; \\ -[a_{cm,x}(t) + g \cdot \theta_{cm,z}(t)] \cdot x, \text{ пл. } xOy, \end{cases} \quad (7),$$

а для обертального руху в площині  $zOx$  – кутову швидкість  $\dot{\Omega}_{cm,y}$

$$\ddot{\Phi} + f \cdot \dot{\Phi} + g \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \frac{\sigma}{\rho} \cdot \left[ \frac{\partial^3 \Phi}{\partial y^3} \right] \Big|_{\Gamma} = \dot{\Omega}_{cm,y} \cdot x \cdot y, \quad (8)$$

де права частина є припустимою апроксимацією відомого потенціалу Жуковського для задачі щодо повільного обертання ємності призматичної форми.

В методі парціальних осциляторів розв'язок задачі (4), (6) зводиться до інтегрування системи диференціальних рівнянь руху для умовних твердих тіл

$$m_k^p \ddot{x}_k + f_k^p (\dot{x}_k - \dot{x}_{cm}) + c_k^p (x_k - x_{cm}) = 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N, \quad (9)$$

інерційні, вагові, дисипативні та пружні характеристики яких відповідати-муть таким же якостям власної форми коливань та силі її зчеплення зі стінками цистерни. Реальна форма цистерни для застосування *метода Фур'є розподілення змінних* є складною, тому введено еквівалентну заміну її на форму прямокутного паралелепіпеда, скориставшись запропонованим *принципом приведення*: збереженням розмірів  $a, b$  вільної поверхні та маси рідини в цистерні, що дало змогу визначити власні частоти  $\nu$  коливань рідини (рис. 3).

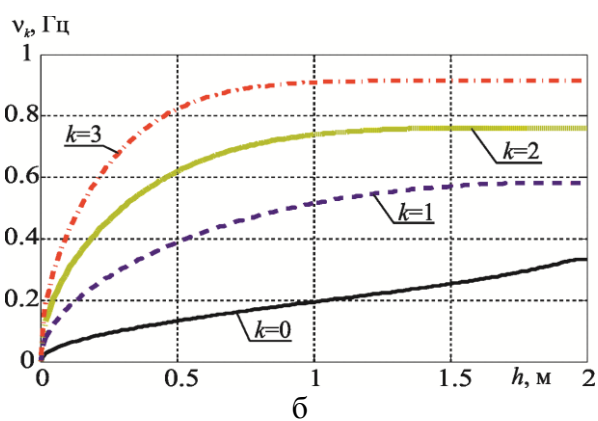
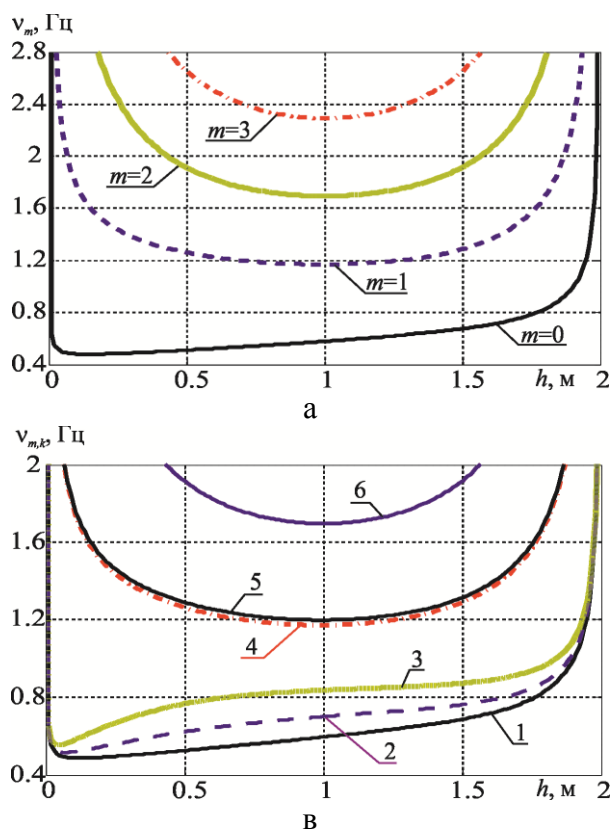
Формули для власних частот використовують *хвильові числа*

$$\beta_m = \frac{\pi(1+2m)}{b}, \quad m = 0, 1, 2, \dots, N;$$

$$\lambda_k = \frac{\pi(1+2k)}{a}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N;$$

$$\gamma_{m,k} = \sqrt{\lambda_k^2 + \beta_m^2}.$$

Вибір необхідної кількості осциляторів обумовлено *принципом збереження вагової складової рідини, що коливається*. Тому, взявши за основу власні форми потенціалів та розкладання стандартного кінематичного збудження в *узагальнений ряд Фур'є за власними формами*, визначено сумарну відносну масу вказаної кількості осциляторів  $\delta M$  для відповідної площини коливань залежно від рівня рідини.



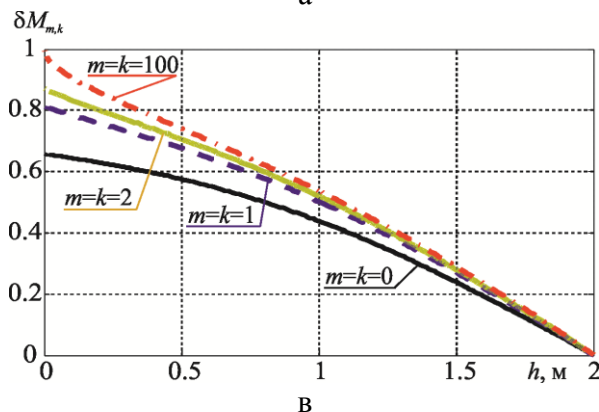
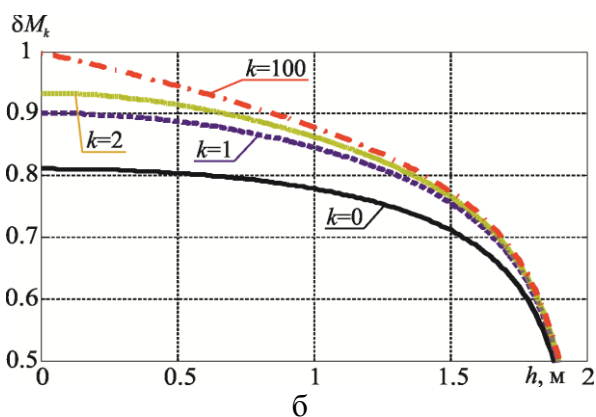
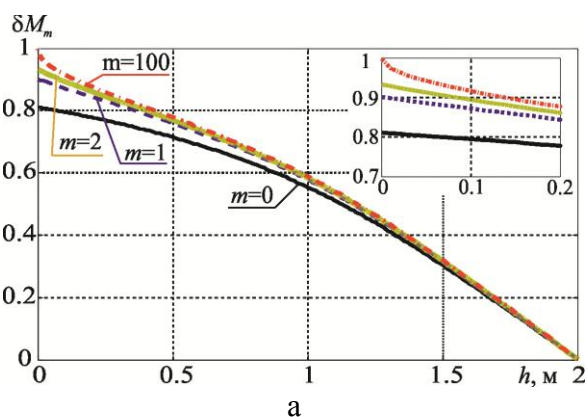
$$zOy: v_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\beta_m \left( g + \frac{\sigma}{\rho} \beta_m^2 \right) \text{th}(\beta_m h)};$$

$$xOy: v_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\lambda_k \left( g + \frac{\sigma}{\rho} \lambda_k^2 \right) \text{th}(\lambda_k h)};$$

$$xOz: v_{m,k} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\gamma_{m,k} \left( g + \frac{\sigma}{\rho} \gamma_{m,k}^2 \right) \text{th}(\gamma_{m,k} h)},$$

де  $\beta_m, \lambda_k, \gamma_{m,k}$  – хвильові числа.

Рисунок 3 – Залежності власних частот від рівня рідини  $h$ , в площинах:  
 а –  $zOy$ ; б –  $xOy$ ; в –  $xOz$ ;  
 1 –  $k=0; m=0$ ; 2 –  $k=0; m=1$ ; 3 –  $k=0; m=2$ ; 4 –  $k=1; m=0$ ; 5 –  $k=1; m=1$ ; 6 –  $k=2; m=0$



$$zOy: \delta M_m = \frac{2}{\pi^2} \sum_{j=0}^m \frac{\text{th}(\beta_j h) / (\beta_j h)}{(j+0,5)^2};$$

$$xOy: \delta M_k = \frac{2}{\pi^2} \sum_{i=0}^k \frac{\text{th}(\lambda_i h) / (\lambda_i h)}{(i+0,5)^2};$$

$$xOz:$$

$$\delta M_{m,k} = \frac{4}{\pi^4} \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^k \frac{\text{th}(\gamma_{j,i} h) / (\gamma_{j,i} h)}{(k+0,5)^2 (i+0,5)^2}.$$

Рисунок 4 – Сумарна відносна маса вказаної кількості осциляторів  
 в залежності від розрахункового рівня рідини:  
 а –  $zOy$ ; б –  $xOy$ ; в –  $xOz$

Встановлено, що незалежно від площини дослідження коливань достатньо використовувати три осцилятора (рис. 4). Вважаємо, що інша частина рідини зсувається та обертається разом зі стінками. Відмітимо, що для кожного осцилятора власна форма коливань рідини має свої від'ємності. Так для 1-го осцилятора зміщення рідини простежується по всій висоті, а для 2-го та 3-го – тільки в верхній частині ємності.

Введення системи парціальних осциляторів дозволило встановити складові коливального руху. Тому, на прикладі руху рідини в площині  $xOy$ , визначено інерційні, масові, пружні та дисипативні показники цих осциляторів:

$$m_1^p = m_p \cdot \delta M_{k=0}; \quad m_2^p = m_p \cdot (\delta M_{k=1} - \delta M_{k=0}); \quad m_3^p = m_p \cdot (\delta M_{k=2} - \delta M_{k=1}).$$

$$J_k^p = m_k^p \cdot H^2; \quad c_k^p = m_k^p \cdot (2\pi \cdot \nu_k)^2; \quad f_k^p = 2\delta_k \cdot \nu_k \cdot m_k^p, \quad (10)$$

де  $m_k^p$  – це парціальна маса рідини;  $c_k^p$  – коефіцієнт жорсткості для зв'язку коливань  $k$ -го шару рідини зі стінками ємності;  $f_k^p$ ,  $\delta_k$  – коефіцієнт демпфірування і логарифмічний декремент загасання (ЛДЗ) цих коливань.

З метою перевірки математичного апарату для визначення основних параметрів вільних коливань рідини залежно від рівня їх наповнення в прямокутній ємності, а також щоб ідентифікувати значення ЛДЗ коливань для рідин різної в'язкості, проведено експериментальне дослідження.

Об'єктом експериментальних досліджень була ємність прямокутної форми з габаритними значеннями 0,3 (Д)х0,2 (Ш)х0,2 (В) м, а також три види рідини: 20% розчин цукру у воді, вода, рослинна (соняшникова) олія. Проведення досліджень відбувалось при температурі навколишнього середовища та рідини +20...25 °С. Дослідження проводилось на рівній твердій поверхні з нахилом меншим за 1 градус, як в поздовжній, так і в поперечній площинах.

Перевірка адекватності використання математичних моделей базувалась на порівнянні теоретичних та експериментальних значень періодів коливань рідини різної в'язкості при трьох рівнях наповнення ємності в поздовжньому та в поперечному площинах коливань. Відхилення при зіставленні не перевищувала 4,35%, що надало змогу стверджувати про доцільність використання описаного вище математичного апарату. Встановлено, що в'язкість рідини майже не впливає на значення частоти вільних коливань.

Експериментальним шляхом визначено декремент загасання вільних коливань рідини різної в'язкості задля уточнення початкових даних при подальших розрахунках. Встановлено, що для 20% розчину цукру ЛДЗ складає  $0,068 \pm 0,005$ ; для води  $0,106 \pm 0,007$ ; для олії  $0,335 \pm 0,03$ .

Отримано формули для визначення ЛДЗ з урахуванням в'язкості рідини та амплітуди її коливань, що є внеском в теорію поверхневих хвиль Релея та підґрунтям для адекватного розрахунку резонансних явищ в тракторній цистерні.

Для поздовжніх коливань рідини у цистерні формула має вигляд

$$\delta_k = \sqrt{\frac{\nu \cdot (m_p / m_k^p)}{\pi \nu_k}} \cdot \left[ \frac{1}{a} + \frac{1}{b} + \frac{(1 + (2h/a))(2k+1)\pi}{a \cdot \text{sh}(2(2k+1)\pi h/a)} \right] + \xi_{\text{mic}} \cdot \frac{\Delta u_k}{a}, \quad (11)$$

де  $\xi_{\text{mic}}$  – коефіцієнт місцевий опору при повороті потоку,  $\xi_{\text{mic}} \approx 1,1$ ;  $\Delta u_k$  – амплі-

туда зміщення центра мас  $k$ -го парціального прошарку рідини;  $a, b$  – довжина та ширина ємності.

У малих ємностях перша складова формули (11) збільшується під впливом сили поверхневого натягу, відповідний коефіцієнт збільшення  $\zeta_k$  дано в роботах Г.Н. Мікишева та Б.Г. Рабіновича, де є посилання на експерименти та результати розрахунків паливних баків ракет. Для великих ємностей (тракторних цистерн) силою поверхневого натягу можна нехтувати, адже її врахування створює величини другого порядку малості. Таке ж допущення дозволяє спростити також і формули для визначення власних частот  $\nu$  коливань рідини.

Використання формули (11) при порівнянні результатів теоретичного та експериментального визначенням ЛДЗ має хорошу збіжність для рідин з малою в'язкістю (вода – 13%; 20% розчин цукру – 0%); для олії отримано похибку в 17%. Для тракторних цистерн, що мають великі розміри, декремент  $\delta_0$  загасання коливань для рідини малої в'язкості становитиме 0,02...0,05, а при перевезенні олії він збільшується до 0,05...0,10. Для другого та третього осциляторів ці значення треба збільшити в 1,5 та 2 рази, відповідно.

Таким чином, сформовано методологічний підхід до поліпшення динамічних властивостей складної механічної системи «трактор – цистерна» шляхом розробки методу розрахунку низькочастотних коливань рідини в тракторних цистернах, який є універсальним щодо форми ємності та дозволяє аналізувати динаміку руху МТА при перевезенні рідини з вільною поверхню.

**Третій розділ** присвячено аналізу коливальних процесів, які виникають при прямолінійному русі трактора з цистерною на транспортних роботах. Наведено принцип побудови лінеаризованої моделі системи «трактор – цистерна». Складено повну карту власних частот та виконано аналіз вільних коливань колісного трактора з агрегатами для перевезення рідини у цистерні в поздовжньо-вертикальній та поперечно-вертикальній площинах.

Рівняння коливань загальної форми для дискретної моделі має вигляд

$$M \cdot \ddot{\vec{Y}} + F \cdot \dot{\vec{Y}} + C \cdot \vec{Y} = \vec{0}, \quad (12)$$

де  $M$  – діагональна інерційна матриця, яка складена із мас та моментів інерції;  $F$  та  $C$  – матриці демпфірування та жорсткості, відповідно.

В цьому розділі матриця  $F$  не розглядається, адже задачею аналізу є знаходження резонансних частот, а коефіцієнти демпфірування на величину частот не впливають. При розрахунку частот рівняння (12) перетворено і зведено до вигляду задачі щодо знаходження спектру узагальненої матриці  $C^*$ :

$$C^* = M^{-1/2} \cdot C \cdot M^{-1/2} > 0; \quad \vec{Y}^* = M^{1/2} \cdot \vec{Y}; \quad \det(\omega^2 I - C^*) = 0. \quad (13)$$

Для аналізу вільних коливань в поздовжньо-вертикальній площині руху трактора з цистернами сформовано 19 диференційних рівнянь другого порядку, тобто при русі збуджується 19 власних частот.

На схемах (рис. 6, 7) кожному з трьох парціальних осциляторів відповідає умовний вантаж, що взаємодіє з оболонкою цистерни через деформацію умовної пружини, а також через умовну опору, де діє сила ваги та сила тертя. Сили взаємодії, на відмінність від об'єктів, є не умовними, а дійсними.

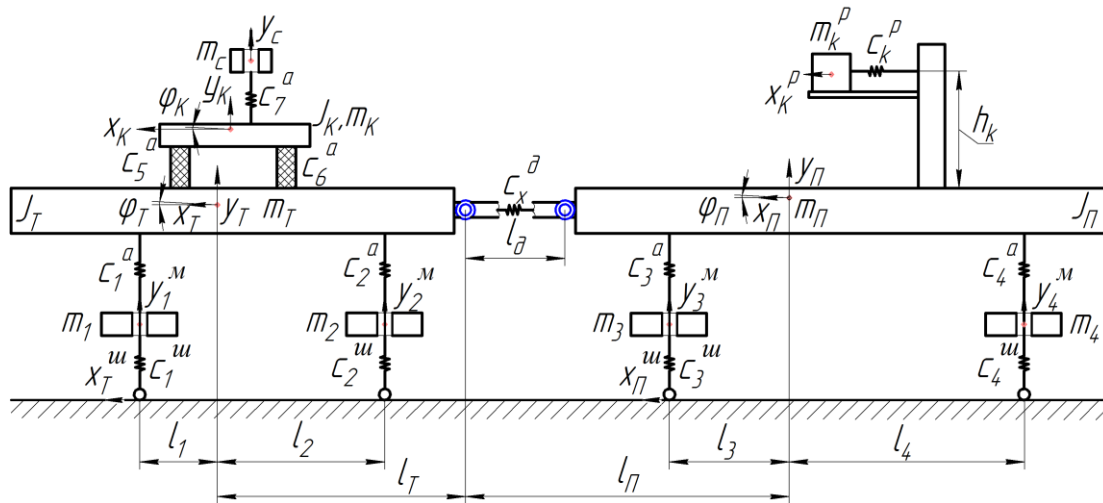


Рисунок 6 – Схема трактору з РЦ для аналізу частот вільних коливань

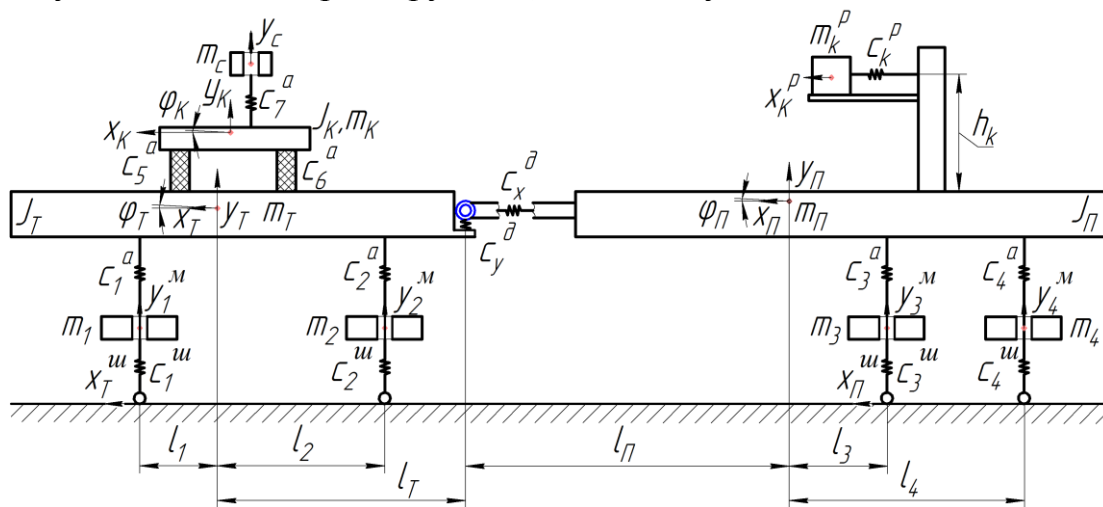


Рисунок 7 – Схема трактору з НЦ для аналізу частот вільних коливань

Матриці жорсткостей  $C$  для МТА з причіпною цистерною (14), а для агрегату з напівпричіпною цистерною (15), приведено до блочного вигляду:

$$C = \begin{bmatrix} [C_T] & [\Theta_1] & [C_{TX}^T] \\ [\Theta_1^T] & [C_{П}] & [C_{ПX}^T] \\ [C_{TX}] & [C_{ПX}] & [C_X] \end{bmatrix} + \frac{R_x}{l_0} \cdot \begin{bmatrix} [C_T^\Psi] & [C_{ТП}] & [\Theta_2^T] \\ [C_{ТП}^T] & [C_{П}^\Psi] & [\Theta_2^T] \\ [\Theta_2] & [\Theta_2] & [\Theta_3] \end{bmatrix} + R_x \cdot \begin{bmatrix} [C_T^R] & [\Theta_1] & [\Theta_2^T] \\ [\Theta_1^T] & [C_{П}^R] & [\Theta_2^T] \\ [\Theta_2] & [\Theta_2] & [\Theta_3] \end{bmatrix}; \quad (14)$$

$$C = \begin{bmatrix} [C_T] & [\Theta_1] & [C_{TX}^T] \\ [\Theta_1^T] & [C_{П}] & [C_{ПX}^T] \\ [C_{TX}] & [C_{ПX}] & [C_X] \end{bmatrix} + C_y \cdot \begin{bmatrix} [C_T^\Psi] & [C_{ТП}] & [\Theta_2^T] \\ [C_{ТП}^T] & [C_{П}^\Psi] & [\Theta_2^T] \\ [\Theta_2] & [\Theta_2] & [\Theta_3] \end{bmatrix} + R_x \cdot \begin{bmatrix} [C_T^R] & [\Theta_1] & [\Theta_2^T] \\ [\Theta_1^T] & [C_{П}^R] & [\Theta_2^T] \\ [\Theta_2] & [\Theta_2] & [\Theta_3] \end{bmatrix}, \quad (15)$$

де  $C_T$ ,  $C_T^\Psi$ ,  $C_T^R$ ,  $C_{П}$ ,  $C_{П}^\Psi$ ,  $C_{П}^R$ ,  $C_{ТП}$  – матриці коефіцієнтів жорсткості, які відносяться до трактора, цистерни та агрегату в цілому і мають однаковий розмір  $[7 \times 7]$ ;  $C_X$  – матриця зв'язку поздовжніх переміщень (її розмір  $[5 \times 5]$ );  $\Theta_1$ ,  $\Theta_2$ ,  $\Theta_3$  – нульові матриці розмірів  $[7 \times 7]$ ,  $[5 \times 7]$  та  $[5 \times 5]$ , які вказують на відсутність силового зв'язку між відповідними групами елементів;  $C_{TX}$ ,  $C_{ПX}$  – не-

квадратні матриці жорсткості зв'язку, що мають розмір  $[5 \times 7]$ .

Матриці коефіцієнтів залежать від двох параметрів – реакції  $R_x$  в зчипному пристрої та рівня навантаження цистерни рідиною. Оскільки обидва параметри приймають неперервні значення зі своїх діапазонів, ця обставина значно ускладнює аналіз та й саму роботу МТА. Тому що, наприклад, при відповідному значенні параметру буде де-факто відбуватися кожне резонансне явище, яке має будь-яку ненульову апріорну вірогідність.

Розраховуючи спектр узагальненої матриці жорсткості  $C^*$ , визначено частоти вільних коливань основних елементів трактора з цистерною (рис. 8), а також встановлено компоненти нормованих (за їх вкладом до загальної кінетичної енергії коливань) форм вільних коливань. З аналізу помітно виникнення динамічної нестійкості системи, коли частоти перетинають нульову лінію (рис. 9), після чого стають уявними величинами, а замість гармонічних розв'язків отримуємо експоненти. Це виникає явище *галопуючого резонансу* у вертикальній площині, яке спостерігається при значному від'ємному значенні поздовжньої сили, що відповідає руху МТА з гори під значним кутом.

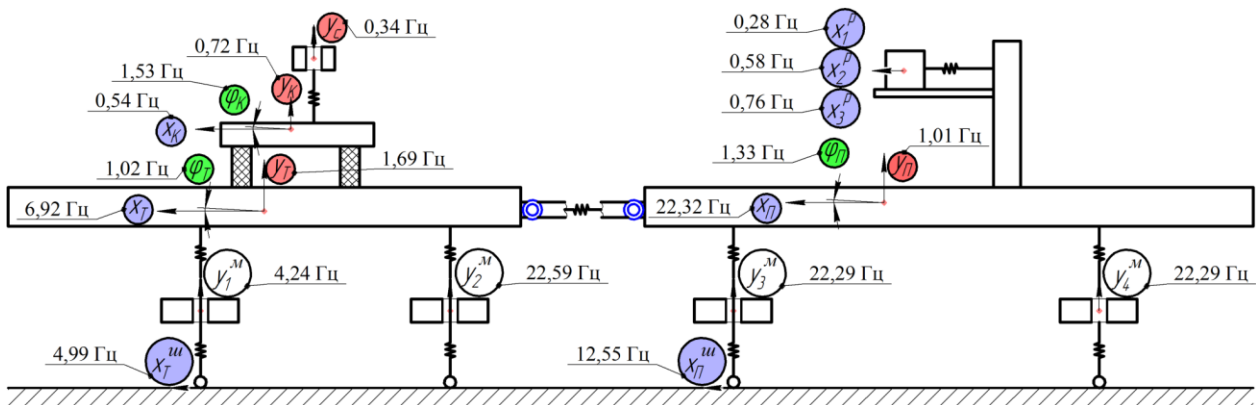


Рисунок 8 – Карта власних частот трактору ХТЗ-242К з ПЦ КТВ BSA 20

На основі аналізу отриманих даних розкрито спектральні ефекти, що розширюють теорію коливань, адже містять самостійну *наукову значимість*. Встановлено:

- монотонну залежність спектральних траєкторій (рис. 9) від значення поздовжньої сили у зчипному пристрої;
- ефект відштовхування спектральних траєкторій (рис. 9, 10), який призводить до відсутності кратних резонансів в групі пов'язаних коливань;
- ефект обміну координат у власних формах спектральних траєкторій (рис. 10) при проходженні зони наближеного резонансу.

Встановлено, що при транспортуванні трактором причіпної цистерни на межу динамічної стійкості суттєво впливає місце розміщення рухомої вісі шарніра на рамі цистерни, зокрема доречно розміщувати вісь шарніра ближче до центру мас рами. Але для повноцінної рекомендації необхідно враховувати курсову стійкість руху такого МТА.

Аналіз роботи гідравлічного змішувача в НПЦ дозволив встановити, що при недостатній жорсткості приводу роторів вплив змішувача на здоров'я

оператора може мати негативний характер, адже його коливання тісно пов'язані з коливаннями кабіни та рухами рідини у цистерні.

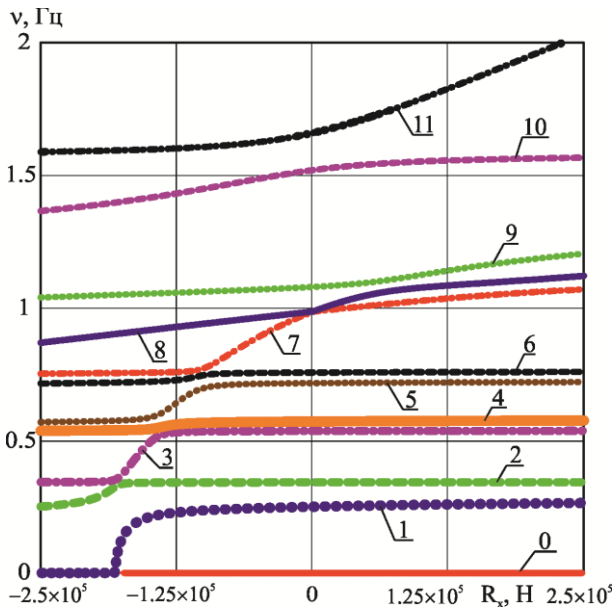


Рисунок 9 – Залежність власних частот від сили  $R_x$  в ПЦ:  
0 – 11 – номер гармоніки

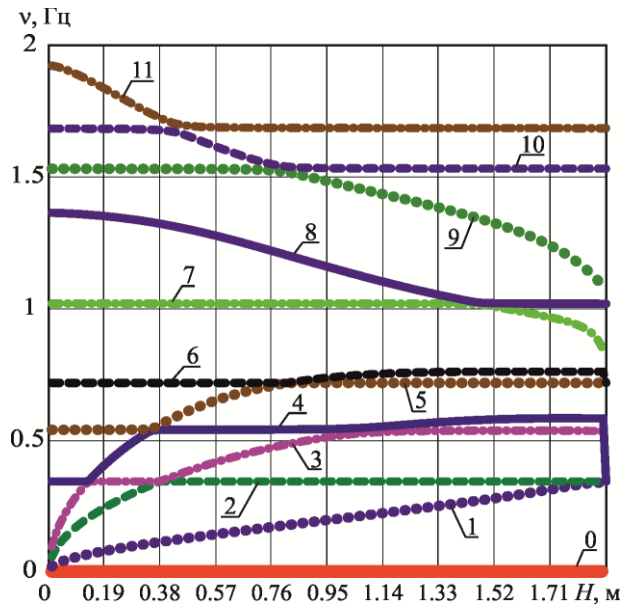


Рисунок 10 – Залежність власних частот від рівня рідини  $H$ :  
0 – 11 – номер гармоніки

Аналізуючи лінеаризовану модель вільних коливань МТА в поперечно-вертикальній площині при транспортуванні цистерни, зауважимо, що коливання рідини до трактора не передаються (спектральні траєкторії осциляторів та трактора перетинаються, бо є незалежними). Проте, встановлено, що НПЦ більш стійка за ПЦ. Адже при аналізі ПЦ встановлено *ефект відштовхування спектральних траєкторій*, наявність якого свідчить про те, що в зоні обміну координат спостерігається несприятливий рух в поперечній площині, який може призвести до коливань високої амплітуди.

Сформована лінеаризована модель трактора з цистернами дає можливість встановлювати складові компоненти форм вільних коливань, що дало змогу зменшити кількість динамічних параметрів системи «трактор – цистерна». З аналізу частот поздовжніх переміщень шарів рідини встановлено, що вони резонують на небезпечній частоті для водія транспортного засобу.

Таким чином, наведено концепцію пасивного захисту водія від коливальних ефектів, які утворюються в системі «трактор – цистерна» при перерозподілі мас рідини, що дало змогу виконувати науково-обґрунтований вибір заходів щодо захисту водія від коливань шкідливих частот, а МТА – від резонансів.

**У четвертому розділі** виконано математичне моделювання сталого руху транспортного засобу по шляху зі складним рельєфом для дослідження динамічних властивостей трактора з цистерною. Виконано аналіз вимушених та параметричних коливань рухомих вузлів МТА з цистернами у поздовжньо- та поперечно-вертикальній площинах, складено повну карту декрементів загасання коливань у пружних елементах трактора (рис. 11) та цистерни.

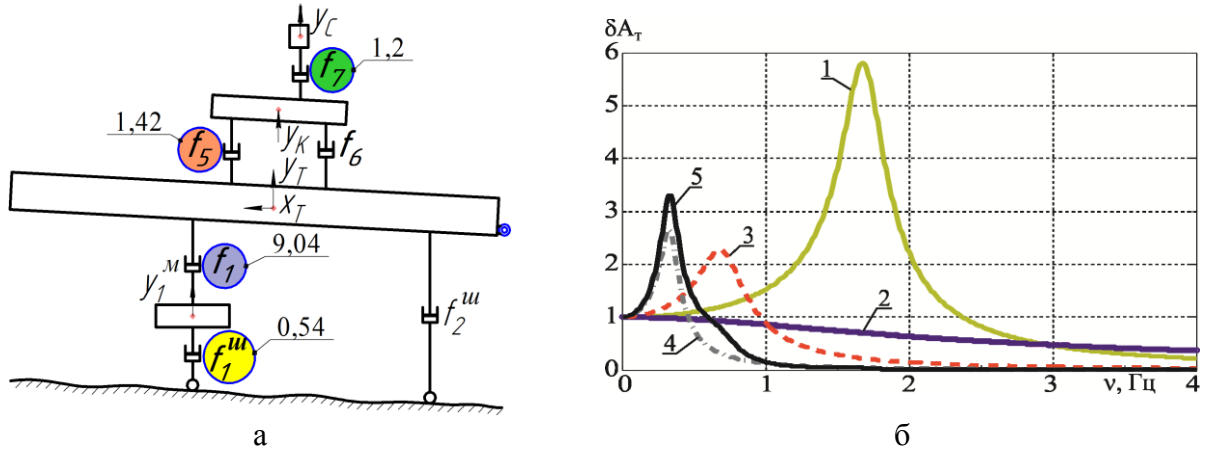


Рисунок 11 – Карта декрементів загасання коливань (а) і АЧХ підвіски трактора (б) ХТЗ-242К:

1 – шини; 2 – моста; 3 – кабіни; 4 – сидіння; 5 – результуюча

Формування нелінійної моделі базується на лінійній моделі, яка спрощена за рахунок об'єднання деяких елементів, але й ускладнена врахуванням дисипативних характеристик системи та інерційних складових маси трактора. Поздовжній рух трактора і цистерни відбувається із однаковою швидкістю та прискоренням, що відповідає рівнянню поступального руху центра мас

$$\left(m_T + \sum_{i=1}^4 m_i + m_{\Pi} + m_P + m_{DV}\right) \ddot{x}_T = P_K - P_{B\Sigma} - P_{ГРТР} - P_{ГРПР} + M_{кр} i_{тр} / r_K, \quad (16)$$

де  $m_T$ ,  $m_i$ ,  $m_{\Pi}$ ,  $m_P$ ,  $m_{DV}$  – маса остову трактора, мостів, рами цистерни, глибинної частини рідини, що рухається разом із оболонкою, приведена до трактора інерційна маса обертального руху елементів двигуна та трансмісії;  $\ddot{x}_T$  – поздовжнє прискорення трактора;  $P_K$ ,  $P_{B\Sigma}$ ,  $P_{ГРТР}$ ,  $P_{ГРПР}$  – сили взаємодії кабіни та рами трактора, сила, що створюється коливанням рідини в цистерні, сумарні сили, що діють на трактор чи цистерну з боку ґрунту у горизонтальному напрямку;  $M_{кр}$  – крутний момент двигуна;  $i_{тр}$  – передавальне відношення трансмісії від валу двигуна до осі колеса;  $r_K$  – радіус колеса трактора.

При побудові нелінійної моделі для дослідження вимушених коливань вводиться припущення, що робота тягово-зчіпного пристрою колісного трактора та цистерни вважається такою, яка не містить зазору, тому горизонтальна та вертикальна сила описується наступним чином:

$$R_x = \frac{\left[ \frac{M_{кр} i_{тр}}{r_K} - P_{ГРТР} - (1 - \Delta l) P_{ГРПР} + P_K \right] \left( m_{\Pi} + \sum_{i=3}^4 m_i \right) + [\Delta l \cdot P_{ГРПР} + P_{B\Sigma}] \left( m_T + \sum_{i=1}^2 m_i \right)}{m_T + m_{\Pi} + \sum_{i=1}^4 m_i};$$

$$R_y = \frac{\sum P_{ТР} / m_T + l_T \cdot \sum M_{ТР} / J_T - \sum P_{ПР} / (m_{\Pi} + m_B) + (l_{\Pi} + l_{\delta}) \cdot \sum M_{ПР} / J_{\Pi}}{1/m_T + l_T^2 / J_T + 1 / (m_{\Pi} + m_B) + (l_{\Pi} + l_{\delta})^2 / J_{\Pi}}, \quad (17)$$

де  $\Delta l$  – сумарний коефіцієнт розкладання сил між мостами цистерни і гаком трактора;  $\sum P_{ТР}$ ,  $\sum P_{ПР}$  – сили, що діють на трактор та цистерну;  $\sum M_{ТР}$ ,  $\sum M_{ПР}$  – моменти сил, які утворюються;  $J_T$ ,  $J_{\Pi}$  – момент інерції трактора та цистерни;  $l_T$ ,  $l_{\Pi}$  – відстані від точки з'єднання дишла до центру мас трактора та

цистерни;  $l_d$  – довжина дишла.

При русі МТА в рідині збуджуються не лише поздовжні, поперечні та обертальні коливання, але й вертикальні зміщення, які призводять до періодичної зміни її ваги. Тому для поздовжніх (а також, для поперечних і обертальних) коливань парціального осцилятора  $x_k^p$  враховано залежність пружного коефіцієнту від вертикальних прискорень центру мас цистерни  $\ddot{y}_\Pi$

$$c_k^p = m_k^p \beta_k (g + \ddot{y}_\Pi) \text{th}(\beta_k h). \quad (18)$$

Така зміна може стати передумовою до параметричних коливань, що у випадку твердого вантажу не спостерігається.

За для якісного моделювання руху МТА необхідно, окрім сталого руху, привести перехідні процеси (розгін та гальмування) (рис. 12). Проте, оскільки це окремі процеси, які відбуваються епізодично і не впливають на показники плавності ходу трактора, то в моделі наведено їх імітаційний опис, що використовує спрощені діаграми зміни крутного моменту двигуна. Запропоновано при описі нерівностей дорожньої поверхні застосовувати дві гармонійні складові, які описують зміну мікро- та макропрофілю дороги, що може використовуватись при дослідженні галопуючого резонансу МТА (рис. 13)

$$y_{ГРj} = A_\lambda \sin\left(\frac{2\pi(x_T - \Delta L_j)}{L_\lambda}\right) + A_\Lambda \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi(x_T - \Delta L_j)}{L_\Lambda}\right)\right), \quad j = 1, \dots, 4, \quad (19)$$

де  $A_\lambda$ ,  $L_\lambda$  – амплітуда та довжина хвилі мікропрофілю нерівності;  $A_\Lambda$ ,  $L_\Lambda$  – амплітуда та довжина хвилі макропрофілю поверхні (бугри та впадини);  $\Delta L_j$  – фазові зсуви, які визначаються відстанню між мостами МТА.

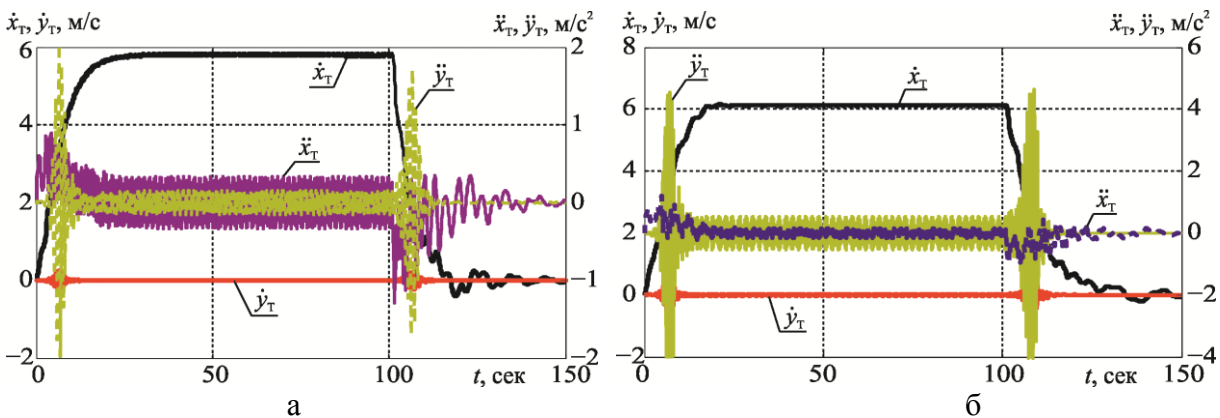


Рисунок 12 – Графіки зміни швидкості та прискорення остова трактора:  
а – XT3-242K з BSA KTW 20; б – XT3-242K з ВНЦ-20

Розроблено метод визначення довжини хвилі мікропрофілю, яка призводить до резонансного збільшення амплітуди коливань рідини у цистерні, що впливає на динамічні властивості МТА при сталому прямолінійному русі (рис. 14) і дозволяє ефективно тестувати МТА в тяжких умовах експлуатації. Метод ґрунтується на визначенні частоти коливань рідини, звідки з періоду коливань та швидкості руху  $\dot{x}_T$  отримаємо резонансну довжину хвилі.

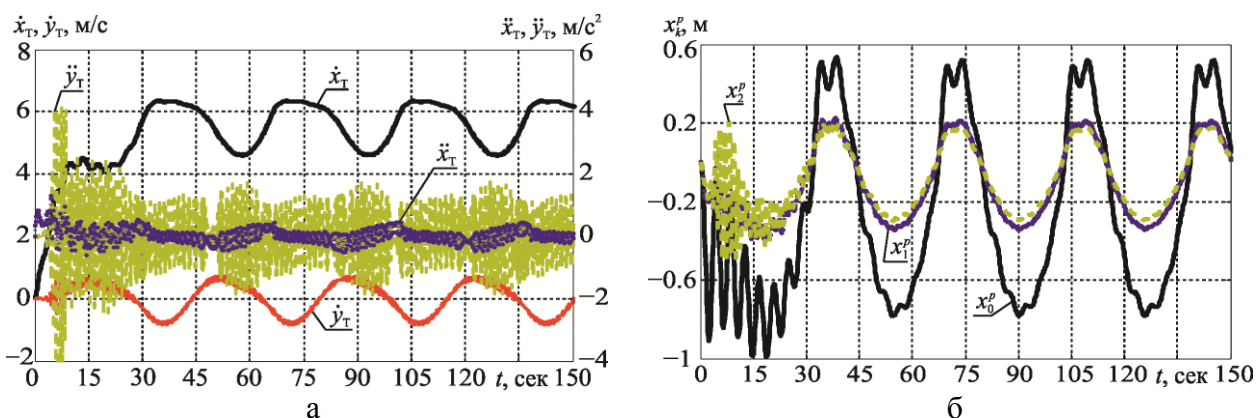


Рисунок 13 – Результати моделювання руху з гори трактора ХТЗ-242К з причіпною цистерною BSA KTW 20 при куті нахилу дороги 12°:  
 а – зміни швидкості та прискорення остова трактора; б – горизонтальні зсуви поверхневих шарів рідини

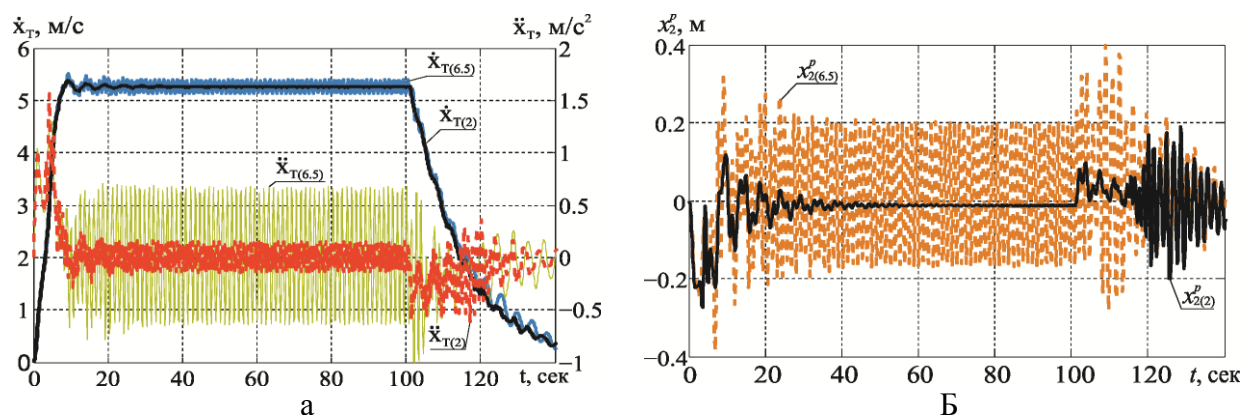


Рисунок 14 – Порівняння показників МТА при русі на тестовому режимі при зміні довжини хвилі мікропрофілю в  $L_\lambda = 2$  м та  $L_\lambda = 6,5$  м:  
 а – зміни швидкості та прискорення остова трактора; б – зміщення поверхневого шару рідини в цистерні

Встановлено, що при моделюванні вимушених коливань трактора з цистерною в поздовжньо-вертикальній площині інколи виникають параметричні коливання. Зазвичай ці коливання простежуються при русі третього парціального шару рідини в цистерні, масово-інерційні показники якого достатньо малі, і це не впливає на рух МТА. Проте впровадження поперечної перегородки в причіпну цистерну призводить до утворення резонансних зсувів 2-го шару рідини (рис. 15), масові характеристики якого значно більші, що надає можливість і небезпеку створення параметричного резонансу.

Параметричний резонанс небезпечний з того, що його частота в два рази менша, ніж частоти інших резонансів, які отримують підсилення за рахунок коливань підвіски цистерни. Але, якщо ще на стадії проектування врахувати цю можливість, то від неї можна відстроїтися за рахунок зміни конструкції.

На цьому шляху отримано практичну рекомендацію щодо визначення жорсткості ходової частини причіпної цистерни з метою уникнення головного параметричного резонансу. Розглянемо умову стійкості при наповненні рідиною цистерни на 50%, бо саме за цієї умови при розвитку параметричного ре-

зонансу амплітуда коливань не впливає на його частоту. Умова має вигляд

$$\nu_{pr} > \nu_1,$$

де  $\nu_{pr}$  – це половинна частота вертикальних коливань цистерни, яка залежить від коефіцієнта жорсткості  $c_{pr}$  і статичної деформації  $\Delta_{pr}$  підвіски і шин цистерни;  $\nu_1$  – частота 1-го парціального шару рідини для поперечних коливань;

$$\nu_{pr} = \sqrt{c_{pr}/m_{pr}}/4\pi = \sqrt{g/\Delta_{pr}}/4\pi; \nu_1 = \sqrt{g\beta_1 th(\beta_1 h)}/2\pi \approx \sqrt{g\beta_1}/2\pi; \beta_1 = \pi/b.$$

Звідки отримуємо умову

$$0,05b > \Delta_{pr}, \quad (20)$$

де  $b$  – це діаметр цистерни.

Зважаючи на умову (20), можна надати рекомендацію при конструюванні тракторних цистерн: при максимальному наповненні рідиною значення додаткової сумарної деформації підвіски і шин не повинно перевищувати 10% від її діаметру.

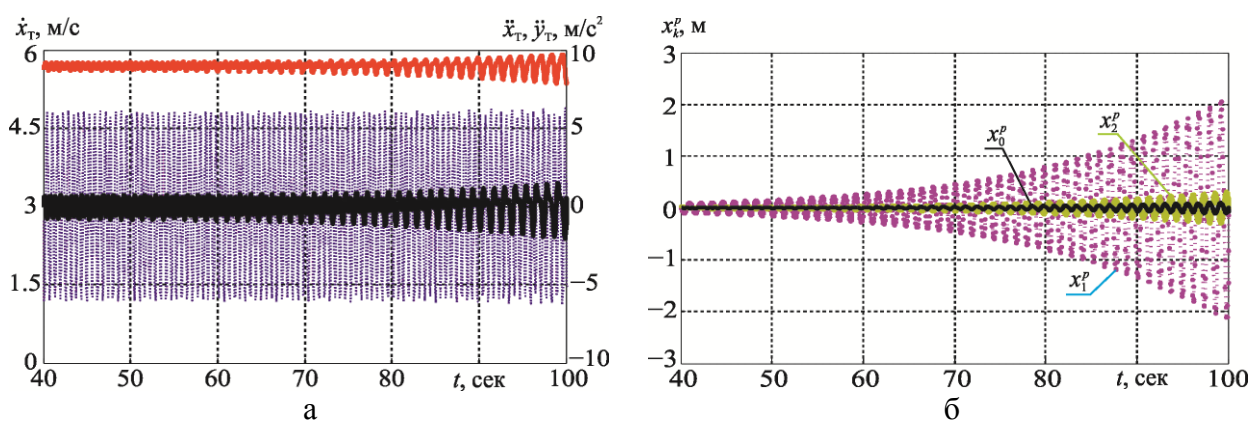


Рисунок 15 – Результати розрахунку руху трактора з причіпною цистерною (1 перегородка) при рівні наповнення  $H = 1,25$  м:

а – зміни швидкості та прискорення остова трактора; б – горизонтальні зсуви центрів мас парціальних шарів рідини

Щодо коливань в поздовжній площині, то умова типу (20) виконується з запасом. Для тракторних цистерн умова (20) не є критичною і дозволяє (в деяких межах) зменшувати тиск у шинах, а також жорсткість інших пружних елементів підвіски. При дослідженні коливань в поперечно-вертикальній площині руху трактора з цистерною виникнення параметричних коливань обґрунтовується тим, що поперечний розмір цистерни є відносно невеликим, і тому власні частоти парціальних осциляторів є більш наближеними до резонансної половинної частоти вертикальних коливань цистерни (рис. 16).

Виокремлено, що утворення параметричних резонансів при русі МТА з цистернами, які мають вільну поверхню, залежить від властивостей транспортованої рідини (рідина з малою в'язкістю є більш піддатливою), кінематичних збурюючих факторів (довжина і амплітуда хвилі мікропрофілю), колісної бази і конструктивних особливостей підвіски трактора та цистерни.

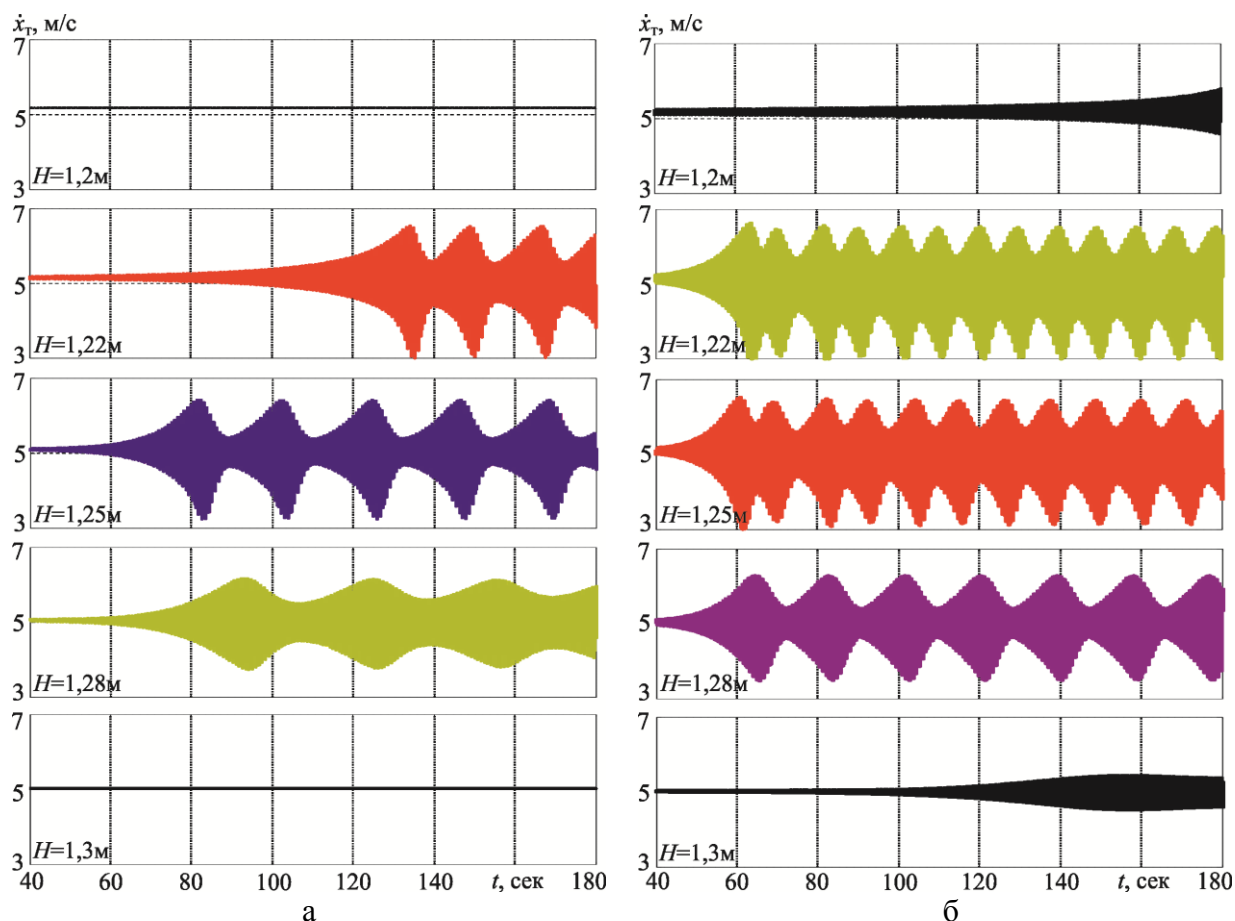


Рисунок 16 – Залежність курсової швидкості руху від рівня рідини  $H$ :  
а – вода; б – 20% розчин цукру у воді

Процес утворення параметричних резонансів залежить від тривалості дії чинника. Якщо амплітуда коливань збурення мала, то МТА з цистерною уникає параметричних резонансів за рахунок існуючих залежностей власної частоти парціального осцилятора та декременту загасання від амплітуди коливань рідини. Проте, якщо транспортувати цистерну по розбитій дорозі та пересіченій місцевості з великою швидкістю, то параметричний резонанс й перерогортання МТА будуть неминучими.

На основі сформованої нелінійної математичної моделі стало можливим описувати динаміку прямолінійного руху колісного трактора при транспортуванні сільськогосподарських цистерн та проводити якісний аналіз вимушених та параметричних коливань МТА, що надає підґрунтя до розширення концепції активного захисту водія від коливальних ефектів, які утворюються в системі «трактор – цистерна» при перерозподілі мас рідини.

**П'ятий розділ** ґрунтується на проведенні експериментального дослідження з визначення динамічних характеристик колісних тракторів з цистернами з метою підтвердження теоретичних залежностей, які описують динаміку поздовжньо-вертикального руху МТА з цистернами (рис. 16). А також в ньому йдеться про визначення подальших шляхів поліпшення динамічних властивостей трактора на основі встановлення рівнів прискорення мас МТА.

Умови проведення експериментальних досліджень відповідали умовам

роботи колісних тракторів загального призначення при виконанні транспортних робіт. Експериментальні дослідження проводились на ділянці укоченої ґрунтової дороги, яка мала довжину 200 м, а її нахил складав не більше 2%. Експериментальні заїзди для випробувань проводилися не менше трьох разів згідно ГОСТ 7057-2003, ГОСТ 24055-2016, СОУ-П УкрНДІПВТ ім. Л.Погорілого 71.2-37-046043090-017:2015. Вимірювальні прилади, які застосовувались, наступні: мобільний вимірювальний комплекс «ВДВММ 4-001» (Паспорт 4-001.000.00 ПС), що складається з 4-ох акселерометрів та радіолокаційного датчика (зادля встановлення дійсної поточної швидкості МТА).



а б  
Рисунок 16 – Об’єкти експериментальних досліджень:  
а – John Deere з МЖТ-16; б – ХТЗ-150К з МЖТ-10

В ході експериментальних досліджень ідентифікуються горизонтальні та вертикальні прискорення на передньому мосту трактора, на задній частині остова трактора, спереду цистерни, на сидінні водія. На основі отриманих масивів даних проведено спектральний аналіз, що дало змогу побудувати амплітудно-частотну (АЧХ) характеристику (рис. 17), а також фазочастотну (ФЧХ). При аналізі лінеаризованої моделі МТА John Deere з МЖТ-16 (з повністю заповненою рідиною) встановлено резонансні частоти (табл. 1).

Таблиця 1 – Резонансні частоти МТА (John Deere з МЖТ-16)

Номер гармоніки	Частота, Гц	Номер гармоніки	Частота, Гц	Номер гармоніки	Частота, Гц
<b>1</b>	0,15	<b>5</b>	0,83	<b>9</b>	1,46
<b>2</b>	0,3	<b>6</b>	0,91	<b>10</b>	1,51
<b>3</b>	0,53	<b>7</b>	1,06	<b>11</b>	1,72
<b>4</b>	0,77	<b>8</b>	1,14	-	-

При порівнянні теоретичних даних з експериментальними значеннями резонансних частот встановлено, що відхилення не перевищує 1,7% – це дає змогу стверджувати про коректність складання лінійної моделі.

В явному вигляді виконувати порівняння значень прискорень, отриманих при моделюванні нелінійної моделі МТА, з експериментальними даними (після використання фільтру) не зовсім коректно. Адже на акселерометри, що кріпляться безпосередньо до МТА, діють різноманітні збуджуючі чинники (нерівність мікропрофілю, коливання силової установки, тощо), які значною мірою викривляють дані. Тому порівняння доцільно проводити на основі співставлення побудованих АЧХ та ФЧХ теоретичних і експериментальних да-

них сталого руху МТА з цистерною. Відмітимо, що при побудові АЧХ та ФЧХ використовуються нормовані значення амплітуд і частот – це обумовлено різним характером та величиною впливу збуджуючих факторів.

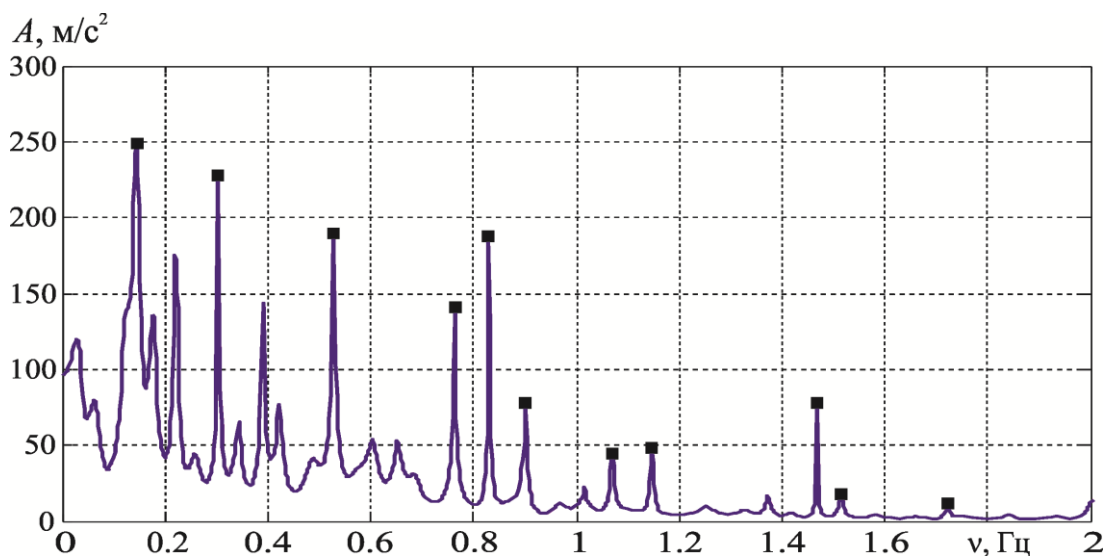


Рисунок 17 – АЧХ прискорення в діапазоні низьких частот, отриманих при експериментальному дослідженні трактора John Deere з цистерною МЖТ-16 (з повністю заповненою рідиною)

Оцінюючи відхилення між теоретичними та експериментальними даними величин нормованих АЧХ, відзначимо, що максимальна розбіжність не перевищує 20%, і це дає достатню точність, а також надає змогу стверджувати про доцільність використання нелінійної моделі коливань трактора з цистерною у поздовжньо-вертикальній площині за умови сталого руху. Такі ж результати отримано і для ФЧХ, де максимальне відхилення при порівнянні теоретичних та експериментальних даних не перевищує 25%.

З метою поліпшення динамічних властивостей руху трактора при транспортуванні рідких вантажів необхідно визначити рівні прискорень на сидінні водія, які виникають в коливальній системі «трактор – цистерна». Вказані дослідження проводяться на сталому режимі руху по малозношеній ґрунтовій дорозі. Враховуючи, що транспортною швидкістю МТА з цистернами є 16 км/год (4,44 м/с), то це досягається для трактора John Deere при транспортуванні цистерни на 13-тій передачі з  $1500 \text{ хв}^{-1}$  колінчастого валу двигуна, а для трактора ХТЗ-150К – на 4-тій передачі робочого ряду з  $2100 \text{ хв}^{-1}$  колінчастого валу двигуна. Швидкість руху в 16 км/год обрана не випадково, адже вона відповідає частоті зовнішнього впливу приблизно 2 Гц, що є наближеною до резонансної частоти остову трактора (рис. 8).

Середньоквадратичні значення прискорень по горизонталі (норма 0,5g) на сидінні оператора-водія знаходяться поблизу норми (рис. 18, 19). Але аналізуючи середньоквадратичні значення прискорення по вертикалі (норма 0,25g) встановлено, що їх величина не задовольняє регламентованим нормам для транспортної техніки. Це спонукає до проведення поглибленого дослідження плавності ходу колісного трактора з цистерною.

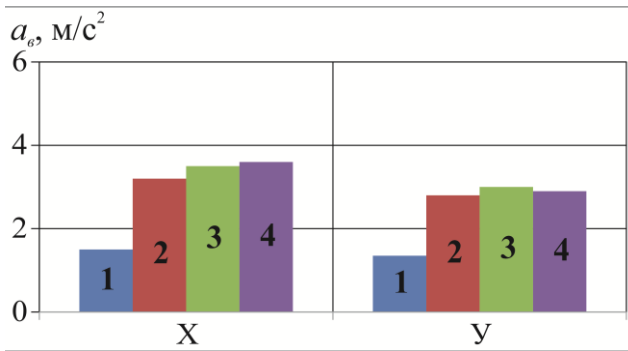


Рисунок 18 – Середньоквадратичні прискорення на сидінні водія МТА «трактор John Deere з цистерною МЖТ-16»:

1 – трактор без цистерни; 2 – цистерна заповнена на  $H = 1,15$  м; 3 – цистерна заповнена на  $H = 1,45$  м; 4 – цистерна заповнена до максимального рівня ( $H = 1,7$  м)

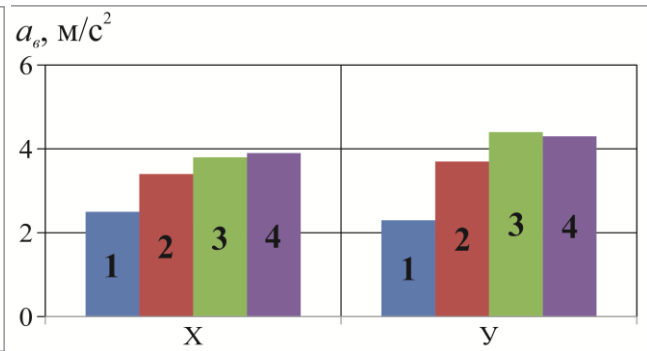


Рисунок 19 – Середньоквадратичні прискорення на сидінні водія МТА «трактор ХТЗ-150К з цистерною МЖТ-10»:

1 – трактор без цистерни; 2 – цистерна заповнена на  $H = 1$  м; 3 – цистерна заповнена на  $H = 1,35$  м; 4 – цистерна заповнена до максимального рівня ( $H = 1,6$  м)

Таким чином, результати експериментальних досліджень надали підґрунтя до повноцінного дослідження низькочастотних коливань колісного трактора з цистернами, що мають вільну поверхню рідини.

У шостому розділі оцінено вплив вертикальних збурюючих сил на колісний трактор при транспортуванні цистерн, що мають вільну поверхню, на основі дослідження показників плавності ходу та динамічного навантаження на ходову систему МТА. А далі проаналізований весь комплекс рекомендацій щодо покращення плавності руху колісного трактора з цистерною.

В розділі 4 наведено нелінійну математичну модель, яка описує рух МТА при перевезенні рідкого вантажу по дорозі зі складним профілем. В цій моделі сила, яка виникає в тягово-зчіпному пристрої (ТЗП), описується двома складовими – горизонтальною та вертикальною. Сам ТЗП описується як з'єднання без зазору, що при дослідженні багатокомпонентного руху є достатнім, але при дослідженні плавності ходу це не припустимо. Тому доцільно впровадити в динамічну модель зазор в ТЗП. Зважаючи на це, розглядати ТЗП необхідно як комбінацію гідрофікованого крюка з вушком НПЦ або ПЦ. При цьому схему дії ТЗП можна розглядати, як роботу шарніра.

Проведено порівняння значень вертикальних прискорень на сидінні водія при русі по асфальтобетонній поверхні одиночного трактора, трактора з цистерною без врахування та з врахуванням зазору в ТЗП.

Встановлено (рис. 20), що врахування зазору в ТЗП доцільно проводити при дослідженні руху МТА з НПЦ, де після врахування зазору інтегральний показник залежності вертикальних прискорень на сидінні водія від частоти зовнішнього впливу, уточнюється більш ніж на 40%. Відзначимо, що велике значення уточнення обумовлено врахуванням кутових прискорень МТА та розривом кінематичного зв'язку між трактором і НПЦ.

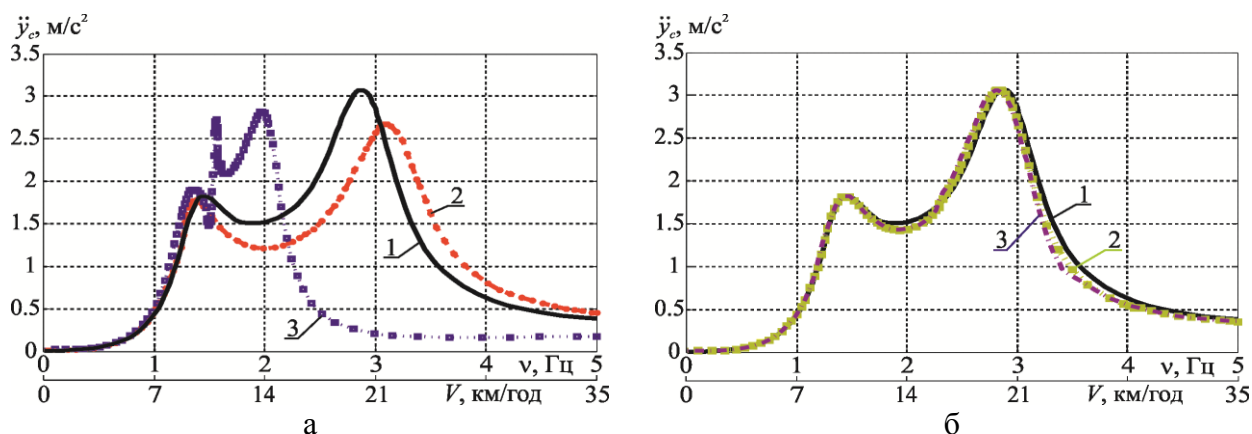


Рисунок 20 – Залежність вертикальних прискорень на сидінні оператора трактору ХТЗ-150К з цистерною при вазі вантажу 10 т:  
а – напівпричіпна; б – причіпна; 1 – одиночний трактор; 2 – ТЗП без врахування зазору; 3 – ТЗП з врахуванням зазору

Оцінено показники плавності ходу трактора при перевезенні рідкого та твердого вантажу (рис. 21). Як об'єкти досліджень використано напівпричіпні агрегати з максимальною масою рідини 10 т (МЖТ-10 та ППТС-10).

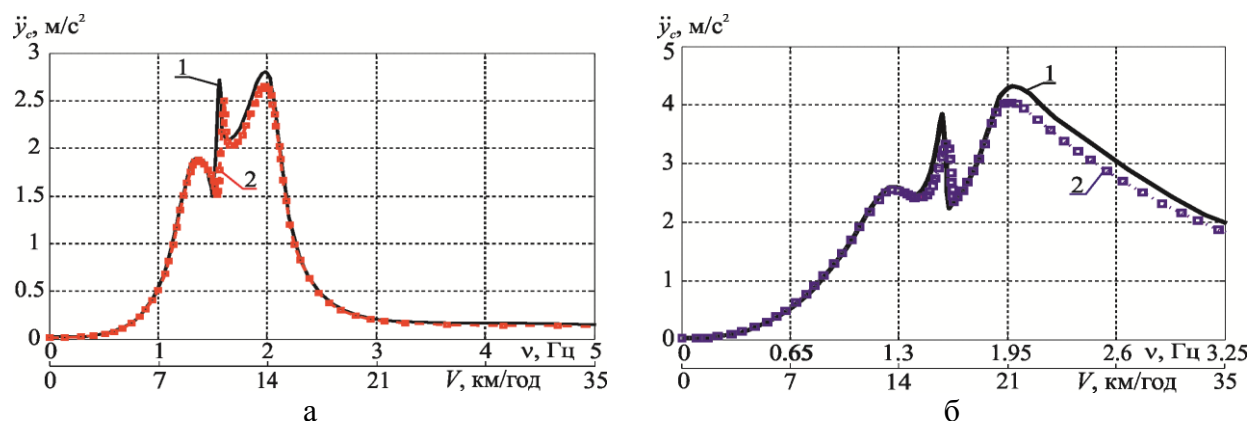


Рисунок 21 – Залежність вертикальних прискорень на сидінні оператора трактора ХТЗ-150К при транспортуванні напівпричіпних агрегатів:  
а – асфальтна дорога; б – ґрунтова дорога; 1 – рідкий вантаж (МЖТ-10);  
2 – твердий вантаж (ППТС-10)

Аналізуючи дані встановлено (рис. 21), що при перевезенні рідкого вантажу резонансна зона коливань НППЦ зміщується (відносно тієї ж зони для твердого вантажу) в бік резонансної частоти для коливань переднього моста на 3,2% при русі по асфальтній дорозі (2,4% по ґрунтовій дорозі). Також спостерігається збільшення амплітуди прискорень: в зоні коливань переднього моста – на 2,2% по асфальтобетонній дорозі (2,6% по ґрунтовій дорозі); в зоні коливань платформи НППЦ – на 8% по асфальтній дорозі (12,3% по ґрунтовій дорозі); в зоні коливань остова трактора – на 5,7% по асфальтобетонній дорозі (10,6% по ґрунтовій дорозі).

Встановлено взаємозв'язок між рівнем наповнення НППЦ та показником плавності ходу колісного трактора. А саме, при зменшенні рівня рідини в цистерні вертикальні прискорення на сидінні водія на резонансній частоті в зоні

коливань НПЦ змінюються за ступеневою функцією до моменту вирівнювання мас трактора та цистерни (рис. 22). При збігу мас цистерни та трактора резонансні коливання НПЦ та остова трактора об'єднуються, утворюючи *внутрішній резонанс*, що веде до збільшення амплітуди коливань.

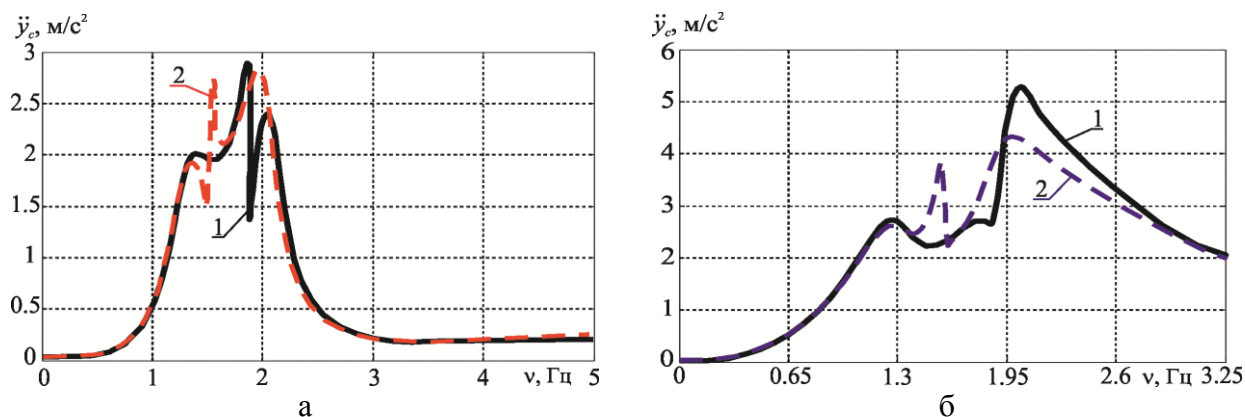


Рисунок 22 – Залежність вертикальних прискорень на сидінні від частоти збудження при транспортуванні цистерни МЖТ-10:

а – асфальтна дорога; б – ґрунтова дорога; 1 – при  $H = 0,8$  м; 2 – при  $H = 1,6$  м

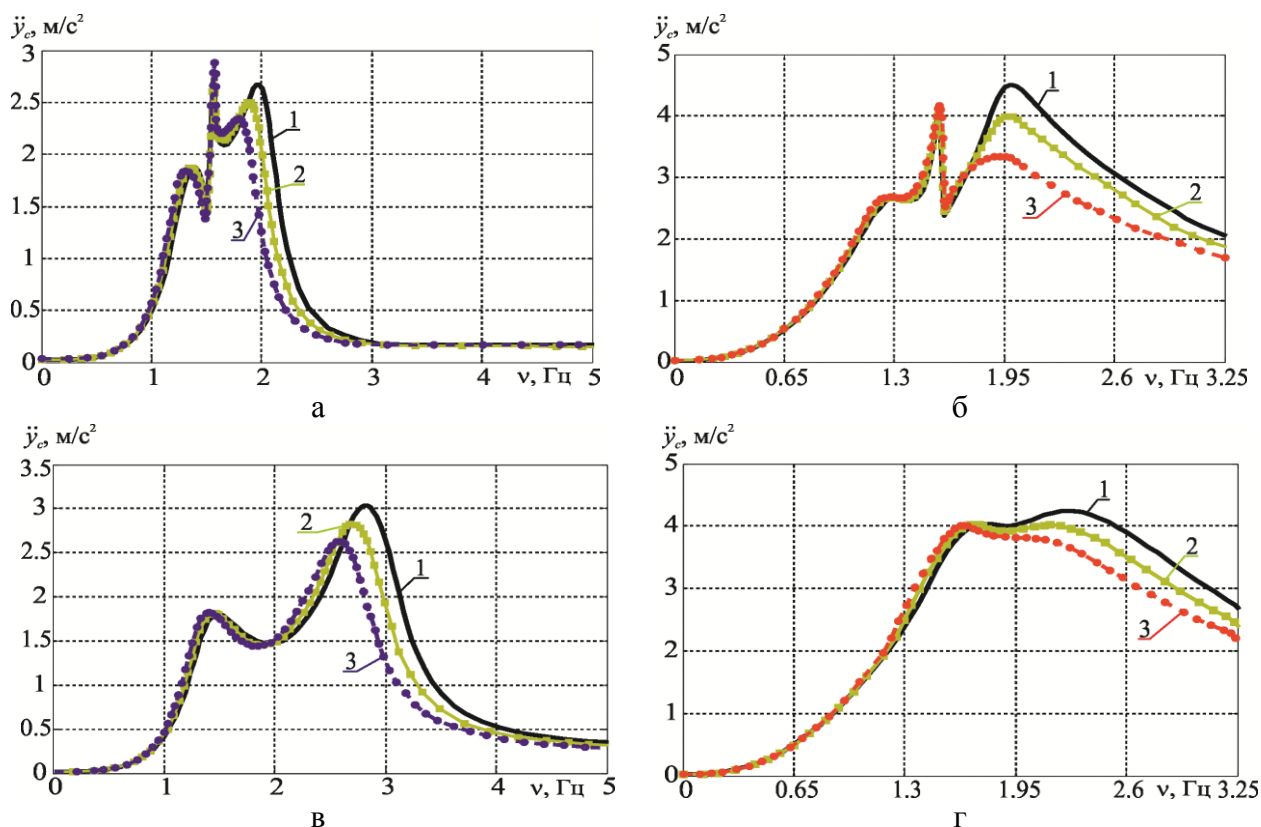


Рисунок 23 – Залежність вертикальних прискорень на сидінні з різним тиском в шинах трактора при транспортуванні цистерни з вантажем 10 т:

а, б – напівпрічпна; в, г – причіпна; а, в – асфальтна дорога; б, г – ґрунтова дорога;

1 –  $p_{sh1} = 160$  кПа і  $p_{sh2} = 140$  кПа; 2 –  $p_{sh1} = 140$  кПа і  $p_{sh2} = 120$  кПа;

3 –  $p_{sh1} = 120$  кПа і  $p_{sh2} = 100$  кПа

Значний вплив на показник плавності ходу колісного трактора при транспортуванні НПЦ здійснюють характеристики тракторних шин (рис. 23) і шин

цистерни. При зниженні тиску в шинах трактора досягається зменшення амплітуди вертикальних прискорень на резонансних частотах переднього моста та остова трактора. А при зменшенні тиску в шинах цистерни це ж явище спостерігається в усіх основних елементах МТА.

Таким чином, в якості практичної рекомендації є те, що при транспортуванні трактором НПЦ, особливо при частковому заповненні, зменшенням тиску на 0,02 МПа в шинах трактора досягається зменшення вертикальних прискорень в зоні резонансних коливань остова трактора на 6,6% при русі по асфальтній дорозі та на 12,8% – по ґрунтовій дорозі. У випадку транспортування трактором ПЦ аналогічне зниження тиску приводить до зменшення вертикальних прискорень в зоні резонансного коливання остова трактора на 13,5% при русі по асфальтобетонній та на 5,2% – по ґрунтовій дорозі.

Проте, при зменшенні тиску в шинах необхідно враховувати зміну техніко-експлуатаційних показників МТА. Тому з метою покращення показників плавності ходу колісного трактора при русі з цистернами і дотримання високих техніко-експлуатаційних показників (витрати палива, продуктивності, тощо) необхідно сформулювати та вирішити відповідну задачу оптимізації.

В наш час на світовому ринку тракторної техніки переважну більшість складають трактори класичної компоновки 4К4а (40% / 60% – з найбільш розповсюдженим розподілом ваги по мостах), і в значно меншій мірі представлено трактори компоновки 4К4б (60% / 40%). Незалежно від компоновки колісних тракторів їх можливо баластувати, тобто розміщувати додатковий вантаж на передню або задню частини напіврам. Баластування колісного трактора класичної компоновки відбувається шляхом довантаження передньої частини трактора, а також розміщенням на колесах баластних вантажів. Що ж стосується тракторів компоновки 4К4б, то баластні вантажі розміщуються на передній напіврамі (практично на всіх моделях, крім ХТЗ), на задній напіврамі та на колесах трактора. Відомо, що баластування колісного трактора несе позитивний характер з точки зору тягової ефективності, тому було визначено вплив баластування на показник плавності ходу трактора при транспортуванні НПЦ.

Виконано дослідження плавності ходу колісного трактора при перевезенні рідкого вантажу з довантаженою задньою напіврамою трактора баластним вантажем вагою  $R^* = 900$  кг та вагою  $R^* = 900 + 1100$  кг.

Розподіл сил, які діють на мости трактора, визначається за формулами

$$R_1 = Gl_2/L \quad \text{та} \quad R_2 = Gl_1/L.$$

В умовах довантаження задньої напіврами розподіл сил змінюється наступним чином:

$$R'_1 = R_1; \quad R'_2 = R_2 + R^*.$$

Тоді

$$l_2^* = L \cdot R_1 / (G + R^*); \quad l_1^* = L \cdot (R_2 + R^*) / (G + R^*).$$

За рахунок поступового довантаження баластним вантажем задньої напіврами змінюється розподіл ваги; в табл. 2 наведено результати такого дован-

таження. В результаті вказаної зміни розподілу ваги змінюється і показник плавності ходу трактора, результати представлено на рис. 24.

Таблиця 2 – Результати зміни розподілу ваги при баластуванні трактора

Об'єкт дослідження	Баластування задньої напіврама	Зміна відстані від центру мас трактора до вісі	
		переднього моста	заднього моста
ХТЗ-150К	–	$l_1 = 1,64$ (57%)	$l_2 = 1,22$ (43%)
ХТЗ-150К + МЖТ-10	$R^* = 0$ кг	$l_1 = 0,93$ (33%)	$l_2 = 1,93$ (67%)
	$R^* = 900$ кг	$l_1 = 1,12$ (39%)	$l_2 = 1,74$ (61%)
	$R^* = 2000$ кг	$l_1 = 1,31$ (46%)	$l_2 = 1,55$ (54%)

Як помітно з рис. 24, баластування трактора ХТЗ-150К при перевезенні НПЦ дозволило змістити резонансну частоту в зоні коливань остову трактора, тобто вивести її пікове значення за діапазон транспортної швидкості руху (16 км/год). Окрім того, баластування вагою  $R^* = 2000$  кг дозволило зменшити величину вертикальних прискорень на сидінні водія в зоні коливань остову трактора на 9% при русі по асфальтній дорозі (на 1% при русі по ґрунтовій дорозі). Відмітимо, що резонансна частота в зоні коливань переднього моста трактора при баластуванні на величину  $R^* = 2000$  кг також зміщується.

Значний інтерес викликає зміна величини вертикальних прискорень на сидінні водія при резонансній частоті в зоні коливань НПЦ, адже при баластуванні вагою  $R^* = 2000$  кг величина вертикальних прискорень збільшується на 5,7% при русі по асфальтобетонній дорозі (на 9,4% при русі по ґрунтовій дорозі). При цьому, як це помітно з рис. 24, подальше нарощування ваги баластних вантажів (тобто до рівня  $R^* > 2000$  кг) призведе до об'єднання резонансних частот остову трактора та НПЦ.

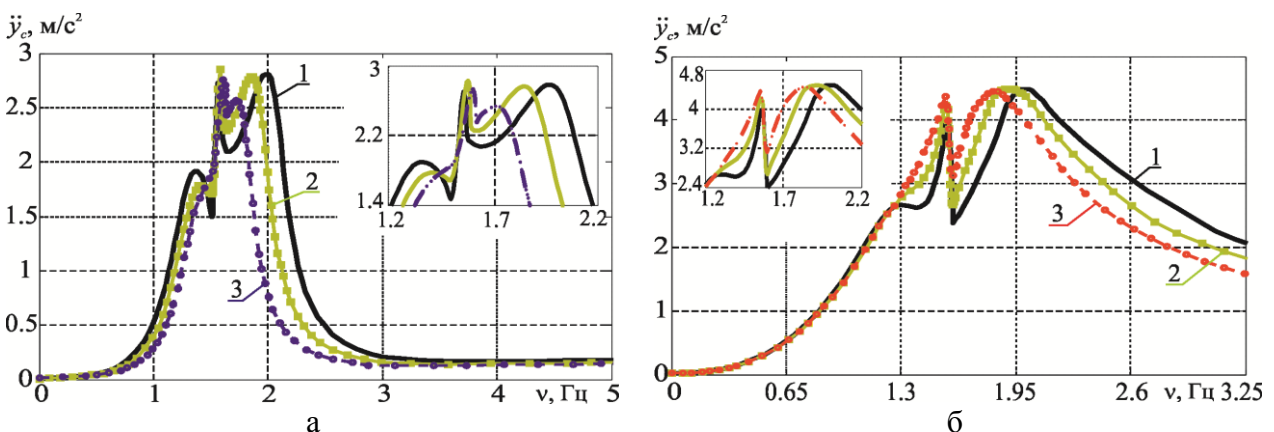


Рисунок 24 – Залежність вертикальних прискорень на сидінні оператора після баластування трактора ХТЗ-150К з цистерною МЖТ-10:

а – асфальтобетонна дорога; б – ґрунтова дорога; 1 –  $R^* = 0$  кг; 2 –  $R^* = 900$  кг;  
3 –  $R^* = 2000$  кг

Таким чином, теоретичним шляхом встановлено доцільність в баластуванні колісного трактора ХТЗ з компоновкою 4К4б при виконанні транспорт-

них робіт з перевезення НПЦ.

Оцінку впливу зовнішніх та внутрішніх збурюючих сил на динамічні властивості МТА можна також встановити на основі дослідження динамічної навантаженості ходової системи. З цієї метою проведено аналіз зміни величин динамічної навантаженості на передню ( $F_{sh1}$ ) та на задню ( $F_{sh2}$ ) ходові системи (рис. 25) одиночного трактора і МТА при транспортуванні НПЦ.

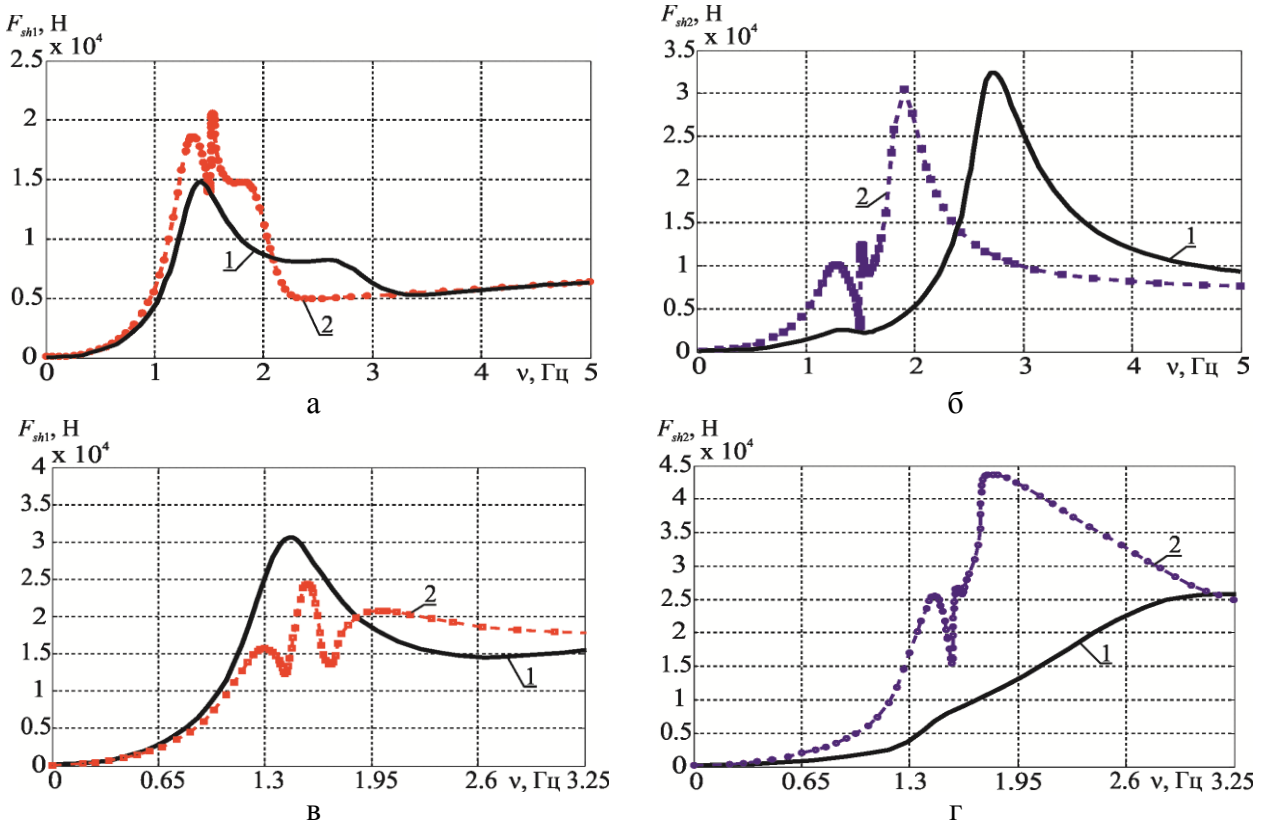


Рисунок 25 – Динамічна навантаженість ходової системи:

а, в – передня підвіска; б, г – задня підвіска; а, б – асфальтна дорога; в, г – ґрунтова дорога; 1 – одиночний трактор ХТЗ-150К; 2 – ХТЗ-150К з НПЦ МЖТ-10

Оцінюючи зміну динамічної навантаженості передньої ходової системи за показником величини інтегральної площі встановлено, що динамічна навантаженість МТА з НПЦ на 6,4% більша при русі по асфальтній дорозі (на 3,8% – по ґрунтовій дорозі), ніж величина інтегральної площі одиночного трактора. Але досліджуючи динамічну навантаженість задньої ходової системи визначено, що динамічна навантаженість МТА з НПЦ на 7,8% менша при русі по асфальтобетонній дорозі (на 60,1% – по ґрунтовій дорозі), ніж величина інтегральної площі одиночного трактора. Така різниця пояснюється довантаженням задньої вісі трактора вагою, яка діє на ТЗП з боку НПЦ.

Оцінено вплив різного рівня наповнення рідиною НПЦ на значення динамічної навантаженості її ходової системи ( $F_{sh3}$ ). Аналізуючи залежності (рис. 26, а), можна констатувати, що при русі МТА по асфальтній дорозі з рівня рідини  $H = 0,5$  м спостерігається дія збурюючих сил, яка направлена з боку трактора до НПЦ. Тобто встановлено межу домінування маси трактора над масою НПЦ.

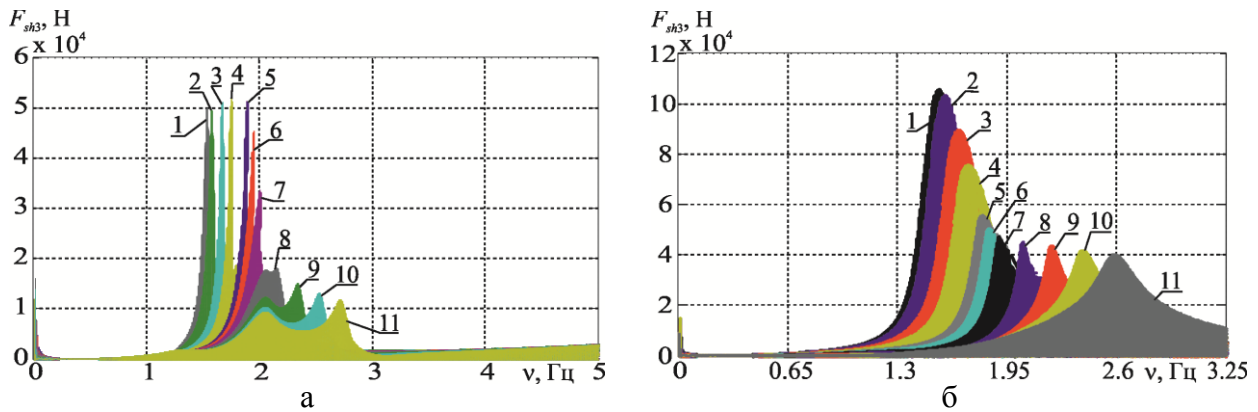


Рисунок 26 – Динамічна навантаженість ходової системи НПЦ МЖТ-10 при різному рівні рідини  $H$ :

а – асфальтна дорога; б – ґрунтова дорога; 1 –  $H = 1,6$  м; 2 –  $H = 1,4$  м; 3 –  $H = 1,15$  м; 4 –  $H = 1$  м; 5 –  $H = 0,8$  м; 6 –  $H = 0,73$  м; 7 –  $H = 0,65$  м; 8 –  $H = 0,5$  м; 9 –  $H = 0,35$  м; 10 –  $H = 0,2$  м; 11 –  $H = 0$  м

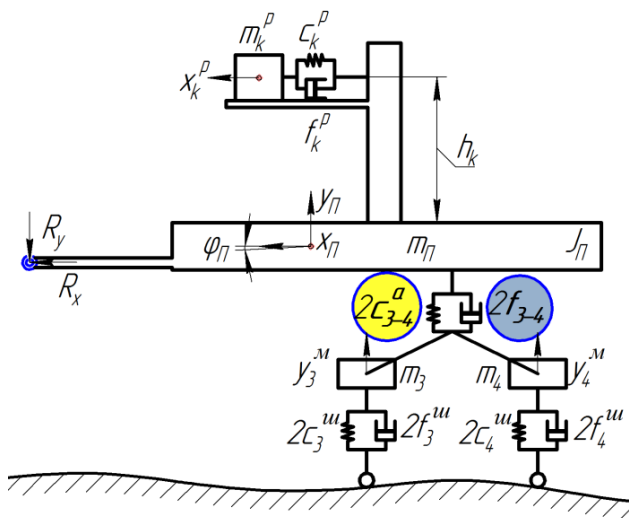


Рисунок 27 – Схема НПЦ для підбору пружних та впровадженні демпфіруючих елементів

Значний вплив на показники плавності ходу трактора і динамічної навантаженості ходових систем трактора та НПЦ здійснюють пружні та демпфірувальні характеристики підвісок (рис. 27). Тому підбір пружних та впровадження демпфіруючих елементів НПЦ є неминучим в ході захисту водія від коливальних ефектів, які утворюються при перевезенні рідини з вільною поверхнею. На рис. 28, залежно від обраної жорсткості підвіски НПЦ, показано залежність динамічної навантаженості від частоти зовнішнього впливу.

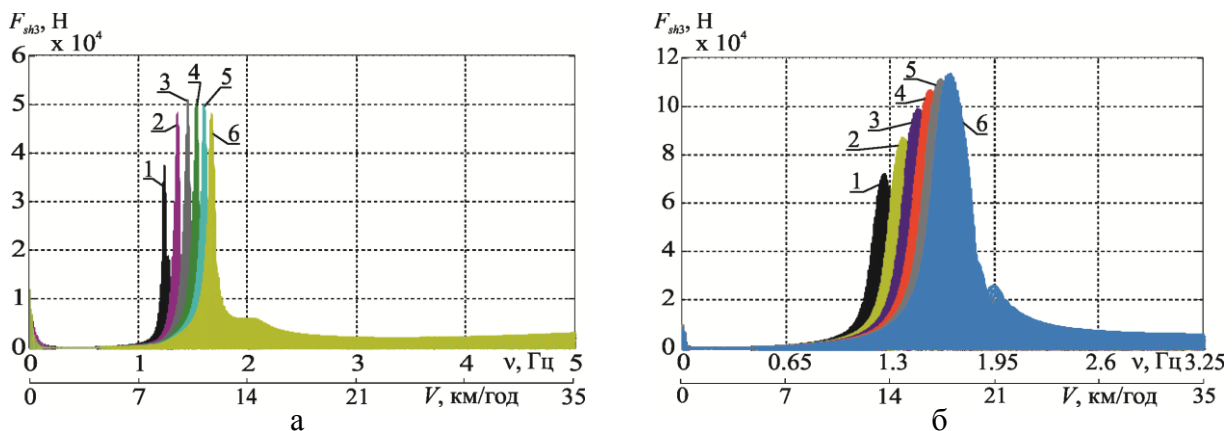


Рисунок 28 – Динамічна навантаженість ходової системи НПЦ МЖТ-10:

а – асфальтна дорога; б – ґрунтова дорога; 1 –  $c_{3-4}^a = 400$  кН/м; 2 –  $c_{3-4}^a = 500$  кН/м; 3 –  $c_{3-4}^a = 600$  кН/м; 4 –  $c_{3-4}^a = 700$  кН/м; 5 –  $c_{3-4}^a = 800$  кН/м; 6 –  $c_{3-4}^a = 900$  кН/м

Встановлено (рис. 28 а), що при  $c_{3-4}^a \geq 700$  кН/м величина динамічної навантаженості на ходову систему НПС має пікові значення та знаходиться в межах *повзучих швидкостей* руху ( $\sim 10$  км/год). При русі по ґрунтовій дорозі величина динамічної навантаженості на ходову систему НПС при  $c_{3-4}^a \geq 700$  кН/м має максимальні значення вже в діапазоні *середніх швидкостей руху* ( $\sim 15 \div 20$  км/год), тому необхідним кроком є впровадження демпфіруючих елементів в підвіску НПС, що призведе до зменшення амплітуди динамічної навантаженості ходової системи НПС.

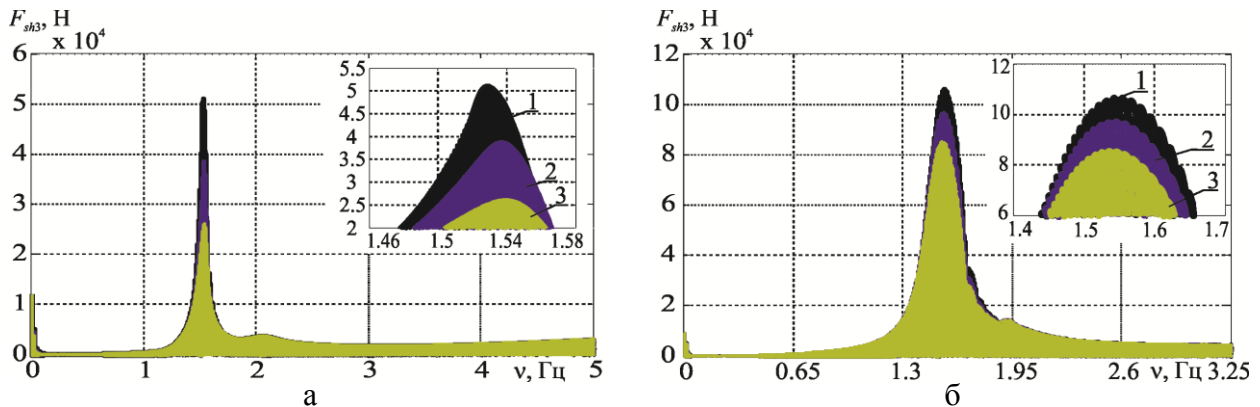


Рисунок 29 – Динамічна навантаженість ходової системи НПС МЖТ-10:  
а – асфальтна дорога; б – ґрунтова дорога; 1 –  $f_{3-4} = 0$  Нс/м; 2 –  $f_{3-4} = 1$  кНс/м; 3 –  $f_{3-4} = 2,5$  кНс/м

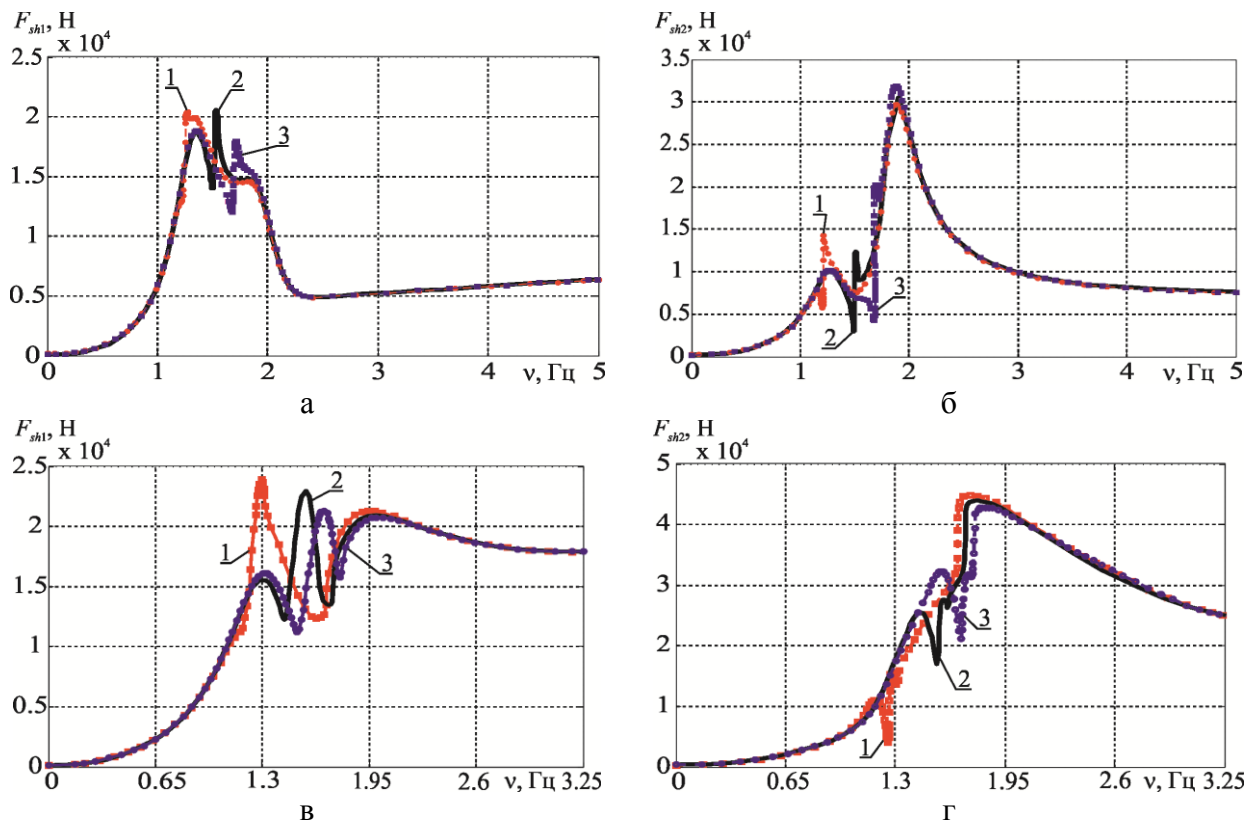


Рисунок 30 – Динамічна навантаженість ходової системи трактора при перевезенні цистерни МЖТ-10 та різною жорсткістю підвіски  $c_{3-4}^a$  :  
а, в – передня підвіска; б, г – задня підвіска; а, б – асфальтна дорога;  
в, г – ґрунтова дорога; 1 –  $c_{3-4}^a = 400$  кН/м; 2 –  $c_{3-4}^a = 700$  кН/м; 3 –  $c_{3-4}^a = 900$  кН/м

З результатів на рис. 29 встановлено, що при значенні коефіцієнту  $f_{3-4} = 2,5$  кНс/м амплітуда динамічної навантаженості ходової системи НПЦ зменшується на 48,7% при русі по асфальтній та на 19,7% – по ґрунтовій дорозі. Проведено аналіз впливу зміни жорсткості підвіски цистерни на ходову систему трактора. З залежностей, які наведені на рис. 30, помітно, що при жорсткості  $c_{3-4}^a = 400$  кН/м підвіски НПЦ вантажопідйомністю 10т збільшується динамічна навантаженість передньої підвіски колісного трактора, а при  $c_{3-4}^a = 900$  кН/м – задньої. Тому для конкретної НПЦ (вантажопідйомністю 10 т) рекомендовано мати коефіцієнт жорсткості підвіски в діапазоні  $700 < c_{3-4}^a < 900$  кН/м з впровадженням амортизатором, який має значення коефіцієнту  $f_{3-4} \geq 2,5$  кНс/м. Зауважимо, що такі зміни не суперечать наданій вище рекомендації щодо значення сумарної статичної деформації підвіски і шин цистерни, яка унеможлиблює утворення параметричного резонансу.

Таким чином, обґрунтовано впровадження раціональної схеми (рис. 27) для системи підресорювання МТА, яка направлена на зменшення впливу низькочастотних коливань поверхневих шарів рідини у цистерні на показники плавності ходу трактора і динамічної навантаженості ходових систем МТА.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична проблема поліпшення плавності ходу та динамічної навантаженості на ходову систему колісних тракторів при транспортуванні рідини в цистернах сільськогосподарського призначення за рахунок визначення раціональних схем та параметрів конструкції, де, внаслідок коливань вільної поверхні рідини, відбувається перерозподіл мас у цистерні.

Результати досліджень дозволили сформулювати основні теоретичні та науково-практичні висновки:

1. Визначено, що при дослідженні використання колісних тракторів на транспортних роботах в аграрному секторі сформовано стійку тенденцію до інтенсифікації цих робіт за рахунок збільшення потужності тракторів та швидкостей перевезення рідини. При цьому значна доля перевезень здійснюється при частковому заповненні цистерни. Це загострює проблеми динаміки, які в умовах руху багатотонних шарів рідини вздовж її вільної поверхні й досі не вирішені, комплексно не систематизовані і не отримали адекватного відображення в математичних моделях, які б з достатньою точністю описували коливальний рух гідромеханічної системи «оболонка цистерни – рідина».

Обраний напрям досліджень визначив необхідність у розробці та впровадженні нових принципів математичного моделювання пов'язаних коливань елементів механічної частини системи «трактор – цистерна», який базується на попередньому аналізі власних частот коливань.

2. Запропоновано методологічний підхід для поліпшення динамічних властивостей колісного трактора з цистерною, який ґрунтується на використанні

нової методики динамічного розрахунку низькочастотних коливань в'язкої рідини в горизонтальній ємності. Сформована методика базується на введенні в розрахункову модель цистерни парціальних осциляторів, які дають змогу обчислити вагові, інерційні, пружні та дисипативні характеристики основних поверхневих шарів рідини, що приймають участь в коливальному русі. Відмінність запропонованої методики від відомих аналогів полягає у тому, що вона, допустимим чином спрощена і адаптована для вирішення задач сучасного тракторобудування в руслі існуючих підходів.

В виконаних експериментальних дослідженнях доведено доцільність і адекватність використання розробленої методики розрахунку низькочастотних коливань рідини на основі моделі парціальних осциляторів; максимальна похибка у визначенні резонансних частот не перевищила 4,35%. Експериментальним шляхом встановлено декремент загасання коливань для рідин з різною в'язкістю, яка відповідає властивостям рідкого вантажу, і запропоновано алгоритм обчислення декремента в залежності від в'язкості, розмірів цистерни та амплітуди коливань.

3. Запропоновано концепцію визначення вільних коливань системи «трактор – цистерна», яка дає змогу знайти спектр коливань у низькочастотному діапазоні частот, а також проаналізувати відповідні власні форми взаємопов'язаних рухів елементів МТА, амплітуди яких нормовані за їх вкладом до загальної енергії коливань. Сформовано детальні лінеаризовані моделі пов'язаних коливань колісного трактора з причіпною та напівпричіпною цистернами в поздовжньо-вертикальній та поперечно-вертикальній площинах, що дало змогу на попередньому етапі оцінювати коливальний рух МТА на основі матричного динамічного аналізу.

За результатами матричного динамічного аналізу, зважаючи на діапазон частот, виконано структурне укрупнення розрахункової моделі, а також встановлено спектральні ефекти, які розширюють та поглиблюють класичну теорію коливань. В лінеаризованій моделі МТА дві фізичні величини – рівень рідини в цистерні та сила тяги – розглядаються як довільні параметри задачі, що відповідає її сенсу, але суттєво ускладнює аналіз. З'ясовано, що при варіюванні силою тяги траєкторії різних частот не перетинаються та мають зламанний вигляд. А у випадку зближення частот, спостерігається обмін координатами між різними формами коливань, що негативно впливає на динаміку МТА, причому, щодо цього погіршення, напівпричіпна цистерна більш стійка за причіпну. До того ж, при від'ємній величині сили тяги, у МТА з причіпною цистерною можливе виникнення галопуючого резонансу.

4. Складено уточнені нелінійні математичні моделі, які дають змогу описувати динаміку прямолінійного руху колісного трактора при транспортуванні цистерн та проводити якісний аналіз вимушених коливань МТА. Запропоновано для математичного тестування динамічних якостей транспортного засобу описувати рельєф дороги 2-ма гармоніками, які мають велику (у діапазоні декількох сотень метрів) та малу (у діапазоні декількох метрів) довжину хвилі.

Представлено метод визначення довжини хвилі дорожнього покриття, яка призводить до резонансного збільшення амплітуди коливань рідини у цистерні, що впливає на техніко-експлуатаційні показники колісного трактора і дозволяє ефективно тестувати їх в найбільш тяжких умовах. На основі сформованих динамічних моделей руху колісного трактора з цистернами виокремлено фактор, який додатково впливає на нелінійність моделі, веде до виникнення параметричного резонансу та характеризується коефіцієнтами пружності поверхневих хвиль рідини, що залежать від вертикального прискорення цистерни.

Встановлено, що впровадження поперечної перегородки в тракторну цистерну несе негативний характер, адже така модернізація створює небезпеку утворення параметричного резонансу в поздовжньо-вертикальній площині руху МТА та має найбільшу амплітуду серед інших резонансів. Визначено, що в поперечно-вертикальній площині виникнення параметричних коливань в парціальних шарах рідини носить стабільний характер, що обґрунтовується відносно невеликим поперечним розміром цистерни і наближенням частот парціальних осциляторів до половинної резонансної частоти вертикальних коливань цистерни. Проте кінематичний чинник, що збуджує такі коливання, зазвичай є достатньо слабким, тому параметричні коливання не перетворюються у параметричний резонанс.

Встановлено, що утворення параметричних резонансів при русі трактора з цистерною залежить від властивостей транспортованої рідини (рідина з малою в'язкістю є більш піддатливою), а також кінематичних збуджуючих факторів (довжини і амплітуди хвилі мікропрофілю дорожнього покриття) і конструкційних особливостей підвіски трактора та цистерни. Запропоновано достатню умову забезпечення стійкості колісного трактора з цистерною щодо параметричних резонансів, згідно якій після наповнення цистерни рідиною додаткове значення сумарної деформації підвіски і шин не повинно перевищувати 10% від поперечного розміру (діаметру) цистерни.

5. На основі отриманих даних експериментального дослідження динамічних характеристик колісних тракторів при транспортуванні рідкого вантажу проведено спектральний аналіз з побудовою амплітудно-частотних характеристик лінійних прискорень МТА. При порівнянні теоретичних (отриманих згідно з принципами динамічного аналізу лінійної моделі коливань в поздовжньо-вертикальній площині) з експериментальними значеннями резонансних частот розбіжність не перевищує 1,7%, що дає змогу стверджувати про коректність складання лінійної моделі.

За рахунок співставлення спектрів лінійних прискорень МТА виконано порівняння експериментальних даних та теоретичних результатів, отриманих при використанні нелінійної моделі коливань в поздовжньо-вертикальній площині з урахуванням спектрів мікропрофілю дорожньої поверхні. Максимальна розбіжність не перевищила 25%, що дає змогу стверджувати про адекватність і доцільність використання нелінійної моделі.

6. За результатами теоретичного дослідження плавності ходу колісного

трактора ХТЗ-150К при транспортуванні цистерн МЖТ-10 встановлено, що при зменшенні рівня рідини в цистерні амплітуди вертикальних прискорень на сидінні оператора-водія в зоні резонансної частоти напівпричіпної цистерни змінюються за ступеневою функцією до моменту вирівнювання мас трактора та цистерни. При рівності мас напівпричіпної цистерни та трактора резонансна частота цистерни об'єднується з резонансною частотою остова трактора, утворюючи внутрішній резонанс, що веде до збільшення амплітуди коливань. Визначено, що при зменшенні тиску на 0,02 МПа в шинах трактора можливо досягти зменшення вертикальних прискорень в зоні резонансних частот остова трактора на 6,6% при русі по асфальтній дорозі та на 12,8% – по ґрунтовій дорозі. У випадку транспортування причіпної цистерни, зменшення тиску на 0,02 МПа в шинах трактора приводить до зменшення вертикальних прискорень в зоні резонансних частот остова трактора на 13,5% при русі по асфальтній дорозі та на 5,2% – по ґрунтовій дорозі.

Шляхом теоретичних досліджень встановлено, що баластування задньої напіврами трактора ХТЗ-150К має позитивний вплив на показники плавності ходу трактора при транспортуванні НЩ, оскільки це приводить до зміщення резонансних частот остова трактора, і при транспортних швидкостях руху ці коливання не виникають.

Встановлено, що ходова система напівпричіпної цистерни має більшу, ніж у причіпній цистерни, динамічну підпорядкованість до вертикального збурення, що вимагає впровадження раціональної схеми і параметрів конструкції підвіски. Встановлено, що при серійній жорсткості підвіски МЖТ-10 понад 700 кН/м величина динамічної навантаженості на ходову систему має пікові значення при русі по асфальтній дорозі зі швидкістю до 10 км/год, а по ґрунтовій дорозі – в інтервалі швидкостей 15÷20 км/год. Тому необхідне впровадження амортизатора з коефіцієнтом демпфірування 2,5 кНс/м, що забезпечить зменшення динамічної навантаженості на 48,7% по асфальтній та на 19,7% – по ґрунтовій дорозі.

Основні результати досліджень динамічних показників колісного трактора при транспортуванні цистерн з вільною поверхнею рідини, які доведено до методів, методик, алгоритмів, програм і практичних рекомендацій використовуються в державних наукових установах, на виробництві і в навчальному процесі.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Кожушко А.П. Підхід до визначення навантаженості трансмісії колісного трактора при впливі нерівностей поверхні / Б.І. Кальченко, І.С. Чернявський, А.П. Кожушко // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків, 2017. – № 8. – С. 49–54.

*Здобувачем оцінено результати теоретичного дослідження плавності ходу та навантаженості трансмісії.*

2. Кожушко А.П. Вплив плавності ходу колісних тракторів на навантаженість трансмісії / Б.І. Кальченко, О.Ю. Ребров, А.П. Кожушко // Автомобільний транспорт. – Харків: ХНАДУ, 2017. – №41. – С. 30–37.

*Здобувачем оцінено результати плавності ходу та звантаженості трансмісії в натурних дослідженнях.*

3. Кожушко А.П. Оцінка плавності руху самохідної машини при впливі нерівностей поверхні / Б.І. Кальченко, А.П. Кожушко, А.Р. Кісельов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 30(1252).– С.56–63.

*Здобувачем оцінено результати дослідження плавності ходу колісного трактора, що рухається по складному мікропрофілю.*

4. Кожушко А.П. Дослідження динамічної стійкості та плавності руху колісних тракторів / Б.І. Кальченко, А.П. Кожушко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Механіко-технологічні системи та комплекси. – Харків : НТУ«ХПІ», 2017. – № 44(1266). – С. 110–115.

*Здобувачем визначено умови динамічної стійкості трактора та НППЦ.*

5. Кожушко А.П. Математичне моделювання низькочастотних коливань в'язкої рідини в горизонтальній ємності з вільною поверхнею/ А.П. Кожушко, О.Л. Григор'єв // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – №3(1279). – С. 41–51.

*Здобувачем виконано математичне моделювання низькочастотних коливань в'язкої рідини в ємності з вільною поверхнею.*

6. Кожушко А.П. Методологічні засади створення сімейства тракторів загального призначення / Б.І. Кальченко, А.П. Кожушко // Автомобільний транспорт. – Харків: ХНАДУ, 2018. – №42. – С. 53–60.

*Здобувачем надано пропозиції щодо системності при проектуванні колісних тракторів за рахунок розчленування системи на ієрархічні рівні.*

7. Плавність руху як складова динаміки трактора: монографія / Б.І. Кальченко, О.Ю. Ребров, А.П. Кожушко, А.Г. Мамонтов –Харків: ФОП Панов А.М., 2018. – 164 с.

*Здобувачем виконано моделювання коливань у поздовжньо-вертикальній площині руху колісного трактора.*

8. Кожушко А.П. Моделювання пов'язаних коливань колісного трактора та цистерни з рідиною на прямому шляху зі складним рельєфом / А.П. Кожушко, О.Л. Григор'єв // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХПІ», 2018. – № 27(1303).– С. 34–61.

*Здобувачем виконано математичне моделювання пов'язаних коливань колісного трактора та цистерни.*

9. Кожушко А.П. Аналіз конструктивних особливостей причіпних та напівпричіпних цистерн у складі машинно-тракторного агрегату / А.П. Кожушко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.: Нові рішення в

сучасних технологіях. – Харків : НТУ «ХП», 2019. – № 5(1330). – С. 34–40.

10. Кожушко А.П. Оцінка енергетичної складової транспортного засобу з агрегатами перемінної маси за рахунок динамічного аналізу вільних коливань / А.П. Кожушко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. : Інноваційні проекти в галузі технічного сервісу машин. – Харків: ХНТУСГ, 2019. – № 201. – С. 217 – 228.

11. Кожушко А.П. Дослідження плавності руху машинно-тракторного агрегату з перемінною масою при виконанні транспортної роботи / А.П. Кожушко // Автомобіль і електроніка. Сучасні технології. – 2019. – № 15. – С. 50–57.

12. Кожушко А.П. Спектральні ефекти та теореми про властивості пучка симетричних матриць в задачах динаміки складних механічних систем / А.П. Кожушко, О.О. Набока, О.Л. Григор'єв // Вісник Національного технічного університету «ХП». Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – № 8(1333). – С. 214–223.

*Здобувачем виокремлено властивості спектру та власних форм матриці коливань при дослідженні поздовжньо-вертикального руху колісного трактора з цистерною, яка наповнена рідиною, що має вільну поверхню.*

13. Kozhushko A.P. Mathematical modeling of free liquid surface motion in transporting agricultural semitrailer tanks / A.P. Kozhushko, A.L. Grigoriev, V.I. Kalchenko // Вісник Національного технічного університету «ХП». Сер.: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ«ХП», 2019. – № 22(1347). – С. 31–38.

*Здобувачем виконано математичне моделювання з визначення впливу роботи гідравлічного змішувача в напівпричпній цистерні.*

14. Кожушко А.П. Формування математичної моделі динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора з напівпричпним агрегатом / А.Г. Мамонтов, А.П. Кожушко, О.Ю. Ребров // Вісник Національного технічного університету «ХП». Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ«ХП», 2019. – №1. – С. 29–41.

*Здобувачем сформовано модель для визначення динамічної навантаженості ходової системи трактора з напівпричпним агрегатом.*

15. Кожушко А.П. Енергетичність системи машинно-тракторного агрегату з перемінною масою за сталого руху / А.П. Кожушко // Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І.Вернадського. Сер. :Технічні науки». – Київ, 2019. – Т. 30 (69). – Ч. 2.– №3. – С. 161–166.

16. Кожушко А.П. Шляхи зменшення впливу поздовжніх коливань транспортного засобу з агрегатами перемінної маси / А.П. Кожушко, С.С. Кравченко, А.Г. Мамонтов, О.О. Болжаларський // Двигатели внутреннего сгорания. – Харків: НТУ«ХП», 2019. – № 2. – С. 59–65.

*Здобувачем окреслено пропозиції щодо шляхів зменшення впливу поздовжніх коливань транспортного засобу з цистерною, яка наповнена рідиною, що має вільну поверхню.*

17. Кожушко А.П. Методика експериментального дослідження визначення динамічних характеристик при русі колісних тракторів з агрегатами змінної маси / А.П. Кожушко, І.В. Колеснік, В.В. Лупенко // Наукове видання Державного університету «Житомирська Політехніка». Технічна інженерія. – Житомир, 2019. – № 2(84). – С. 21–28.

*Здобувачем сформовано методику експериментального дослідження для визначення динамічних характеристик при русі колісних тракторів.*

18. Кожушко А.П. Спектральний аналіз експериментальних даних руху колісних тракторів з агрегатами змінної маси / А.П. Кожушко // Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Сер.: Технічні науки». – Київ, 2019. – Т. 30(69). – Ч.2. – №5. – С. 134–143.

19. Кожушко А.П. Дослідження динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора з агрегатами змінної маси / А.П. Кожушко // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Сер. : Проблеми надійності машин. – Харків: ХНТУСГ, 2019. – № 205. – С. 159–172.

20. Кожушко А.П. Експериментальні дослідження ергономічних властивостей колісних тракторів з агрегатами змінної маси / А.П. Кожушко // Автомобільний транспорт. – Харків: ХНАДУ, 2019. – №45. – С. 38–45.

21. Кожушко А.П. Аналіз впливу коливань рідкого вантажу в напівпричпній цистерні на показники руху колісного трактора / А.П. Кожушко, О.Ю. Ребров, Б.І. Кальченко, А.Г. Мамонтов // Scientific Journal «ScienceRise». – 2019. – № 12(65). – С. 16–19.

*Здобувачем виконано дослідження техніко-економічних показників МТА на основі пов'язаних коливань колісного трактора та цистерни з рідиною на прямому шляху зі складним рельєфом.*

22. Кожушко А.П. Дослідження малих поперечних коливань агрегатів змінної маси / А.П. Кожушко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. – № 1(1355). – С. 33–43.

23. Kozhushko A. Mathematical model of diesel engine characteristics for determining the performance of traction dynamics of wheel-type tractor / O. Rebrov, A. Kozhushko, B. Kalchenko, A. Mamontov, A. Zakovorotniy, E. Kalinin, E. Holovina // «EUREKA: Physics and Engineering». – 2020. – № 4. – P. 90–100.

*Здобувачем виконано моделювання руху колісного трактора з перемінним тяговим навантаженням.*

24. Кожушко А.П. Вплив перемінної маси рідкого вантажу на динамічну навантаженість ходової системи транспортованих агрегатів / А.П. Кожушко // Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів. – Харків, 2020. – № 21. – С. 75–86.

25. Кожушко А.П. Основні принципи математичного моделювання динаміки транспортування рідкого вантажу та дослідження на параметричний резонанс в умовах перерозподілу мас в цистерні / А.П. Кожушко, О.Л. Григор'єв // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.:

Динаміка і міцність машин. – Харків : НТУ «ХП», 2020. – № 1. – С. 13–30.

*Здобувачем надано пропозиції щодо принципів математичного моделювання динаміки транспортування рідкого вантажу та дослідження на параметричний резонанс в умовах перерозподілу мас в цистерні в поперечно-вертикальній площині руху.*

26. Кожушко А.П. Аналіз впливу параметричного резонансу на рух тракторної цистерни при транспортуванні рідкого вантажу / А.П. Кожушко, О.Л. Григор'єв // Вісник Національного технічного університету «ХП». Сер.: Динаміка і міцність машин. – Харків : НТУ «ХП», 2020. – №2. – С. 57–66.

*Здобувачем виконано дослідження параметричного резонансу в поздовжньо-вертикальній площині руху.*

27. Кожушко А.П. Експериментальне та розрахункове дослідження затухань коливань рідини в ємності з вільною поверхнею / А.П. Кожушко // Вісник Національного технічного університету «ХП». Сер.: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Харків : НТУ «ХП», 2020. – № 1. – С. 24–43.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

28. Кожушко А.П. Визначення складових сил, які діють на платформу цистерни машинно-тракторного агрегату /А.П. Кожушко// Wykonane na materiałach Konferencji Międzynarodowej Naukowo-Praktycznej «Science, research, development #11. Technics and technology», Rotterdam (The Netherlands), 29.11.–30.11.2018. – Warszawa : Sp. Zo.o. «Diamond trading tour», 2018.– P.55–58.

29. Кожушко А.П. Математичне моделювання транспортної роботи машинно-тракторним агрегатом в умовах перерозподілу мас в цистерні / А.П. Кожушко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: XXVII міжнар. науково-практич. конф. MicroCAD-2019, 15-17 травня 2019 р.: тези доп. – Харків: НТУ «ХП», 2019. – Ч.1. – С. 65.

30. Кожушко А.П. Математичне моделювання руху вільної поверхні рідини в сільськогосподарських цистернах / А.П. Кожушко, О.Л. Григор'єв // Математичне та імітаційне моделювання систем: Чотирнадцятої міжнар. науково-практич. конф. МОДС 2019, 24-26 червня 2019 р. : тези доп. – Чернігів : ЧНТУ, 2019. – С. 102–105.

*Здобувачем запропоновано підхід до імітації руху вільної поверхні рідини в сільськогосподарських цистернах.*

31. Кожушко А.П. Особливості виконання транспортних робіт причіпними та напівпричіпними агрегатами у складі машинно-тракторної техніки / А.П. Кожушко, А.Г. Мамонтов // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Автомобільний транспорт в аграрному секторі: проектування, дизайн та технологічна експлуатація», 16-17 травня 2019 р.: тези доп. – Харків : ХНТУСГ, 2019. – С. 125.

*Здобувачем окреслено конструктивні особливості машинно-тракторної техніки при виконання транспортних робіт причіпними та напівпричіпними агрегатами.*

32. Кожушко А.П. Статистичний аналіз експериментальних даних при виконанні транспортної роботи трактором з цистерною / А.П. Кожушко // International scientific and practical conference «Technical sciences: history, the present time, the future, EU experience» Wloclawek, Republic of Poland, 27 – 28 September 2019. – Riga : Baltija Publishing, 2019. – P. 158–162.

33. Кожушко А.П. Динамічна навантаженість ходової системи колісного трактора з агрегатами змінної маси / А.П. Кожушко // Збірник матеріалів міжнар. науково-методич.конф. «Проблеми надійності машин», присвячена пам'яті академіка В.Я. Аніловича, 12-13 листопада 2019 р. : тези доп. – Харків : ХНТУСГ, 2019. – С. 51.

34. Kozhushko A., Riezva K. Comparison a running smoothness of a wheeled tractor with a semitrailer tank or unit while driving on asphalt-concrete surface / A. Kozhushko, K. Riezva // Proceedings of the 3rd annual conference «Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions», 23 November 2019. – Talinn, Estonia, 2019. – P. 39–41.

*Здобувачем досліджено вплив на показники плавності ходу колісного трактора при виконанні транспортної роботи з перевезення твердого та рідкого вантажу.*

35. Кожушко А.П. Передумови до виникнення параметричного резонансу колісного трактора при транспортуванні агрегатів перемінної маси / А.П. Кожушко // Матеріали міжнар. науково-практич.конф. «Експлуатаційна та сервісна інженерія», 15-16 жовтня 2020 р. : тези доп. – Харків : ХНТУСГ, 2020. – С. 101–102.

*Праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

36. Кожушко А.П. Розвиток математичної моделі криволінійного руху двовісного автомобіля / Б.І. Кальченко, О.В.Головіна, А.П. Кожушко, С.В. Редчиць // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер.: Автомобіле- та тракторобудування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2017. – № 13(1235). – С. 45–50.

*Здобувачем виконано математичне моделювання криволінійного руху двовісного транспортного засобу.*

37. Коливання механічних систем в автомобіле- та тракторобудуванні: навчальний посібник / А.П. Кожушко. – Харків: ФОП Панов А.М., 2018. – 316 с.

38. Кожушко А.П. Дослідження процесу розгону машинно-тракторного агрегату з гідрокерованою трансмісією при виконанні транспортної роботи / Б.І. Кальченко, А.П. Кожушко, Є.С. Пелипенко, О.О. Ярита // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – Харків: ХНАДУ. – 2019. – № 85. – С. 14–21.

*Здобувачем досліджено перехідний процес виходу на робочу швидкість машинно-тракторного агрегату при виконанні транспортної роботи.*

39. Патент України на корисну модель 136382,МПК (2019.01), В 60 К 17/00. Трансмісія транспортного засобу / А.П. Кожушко, Б.І. Кальченко; заявник та патентообладач НТУ «ХПІ» (Україна). – № u 2019 02822; заявл.21.03.

2019; опубл.12.08.2019, Бюл. № 15.

*Здобувачем розроблено технічне рішення, яке дозволяє забезпечити перемикає передачі без розриву потоку потужності у роздавальній коробці передач.*

40. Патент України на корисну модель 138508, МПК (2019.01), F 02 D 41/10. Спосіб мікроконтролерного регулювання частоти обертання колінчастого вала дизеля / А.О. Прохоренко, С.С. Кравченко, Д.С. Таланін, С.Ю. Білик, А.П. Кожушко, І.В. Шуба; заявник та патентообладач А.О. Прохоренко, С.С. Кравченко, Д.С. Таланін, С.Ю. Білик, А.П. Кожушко, І.В. Шуба (Україна). – № u 2019 06158; заявл.03.06.2019; опубл.25.11.2019, Бюл. № 22.

*Здобувачем розроблено технічне рішення, яке дозволяє забезпечити корегування частоти обертання колінчастого вала дизеля в двигуні внутрішнього згоряння на основі мікроконтролерного регулювання.*

## АНОТАЦІЇ

**Кожушко А.П.** Динамічний аналіз та методи поліпшення плавності ходу колісного трактора при транспортуванні рідких вантажів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.02 – автомобілі та трактори (13 – Механічна інженерія, 27 – Транспорт). – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2021 р.

Дисертацію присвячено розв'язанню науково-прикладної проблеми поліпшення показників плавності ходу та динамічної навантаженості на ходову систему колісних тракторів при транспортуванні рідини в цистернах сільськогосподарського призначення за рахунок визначення раціональних схем та параметрів конструкції МТА для зменшення негативного впливу низькочастотних коливань поверхневого шару рідини у цистерні.

Проаналізовано умови, які впливають на динамічну складову руху колісних тракторів при транспортуванні рідини в цистернах сільськогосподарського призначення. Розглянуто принципи врахування руху вільної поверхні рідини в замкнутій ємності. Виконано аналіз коливальних процесів складної механічної системи «трактор – цистерна». Окреслена методологія нового підходу з визначення коливального руху рідини в замкнутій ємності з вільною поверхнею. Виконано динамічний аналіз прямолінійного руху колісного трактора з цистерною на транспортних роботах. Виокремлено спектральні явища, які розширюють теорію коливань. Оцінено вплив кінематичного та силового збурення на систему «трактор – цистерна», зокрема висвітлено умови виникнення параметричного резонансу. Експериментально доведена адекватність математичних алгоритмів з визначення динамічних характеристик колісних тракторів з цистернами. Наведені перспективні методи поліпшення динамічних властивостей колісного трактора, які базуються на визначенні раціональних схем та параметрів конструкції МТА з метою зменшення негативного впливу низькочастотних коливань поверхневого шару рідини у цистерні.

Запропоновані в дисертації основні наукові положення, розробки та рекомендації впровадженні на інжинірингових та виробничих підприємствах.

**Ключові слова:** трактор колісний, цистерна, роботи транспортні, коливання, вільна поверхня рідини, динаміка руху, плавність ходу, динамічні навантаження, ходова система.

**Кожушко А.П.** Динамический анализ и методы улучшения плавности хода колесного трактора при транспортировке жидких грузов. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.22.02 – автомобили и тракторы (13 – Механическая инженерия, 27 – Транспорт). – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2021

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы улучшения показателей плавности хода и динамической нагруженности на ходовую систему тракторов при транспортировке жидкости в цистернах сельскохозяйственного назначения за счет определения рациональных схем и параметров конструкции МТА для уменьшения негативного влияния низкочастотных колебаний поверхностного слоя жидкости в цистерне.

Проанализированы условия, которые влияют на динамическую составляющую движения тракторов при транспортировке жидкости в цистернах сельскохозяйственного назначения. Рассмотрены принципы учета движения свободной поверхности жидкости в замкнутой емкости. Выполнен анализ колебательных процессов сложной механической системы «трактор – цистерна». Обозначена методология нового подхода по определению колебательного движения жидкости в замкнутой емкости со свободной поверхностью. Выполнен динамический анализ прямолинейного движения колесного трактора с цистерной на транспортных работах. Выделены спектральные явления, которые расширяют теорию колебаний. Оценено влияние кинематического и силового возмущения на систему «трактор – цистерна», в частности освещены условия возникновения параметрического резонанса. Экспериментально доказана адекватность математических алгоритмов по определению динамических характеристик колесных тракторов с цистернами. Приведены перспективные методы улучшения плавности хода и динамической нагруженности на ходовую систему тракторов, основанные на определении рациональных схем и параметров конструкции МТА с целью уменьшения негативного влияния низкочастотных колебаний поверхностного слоя жидкости в цистерне.

Предложенные в диссертации основные научные положения, разработки и рекомендации внедрены на инжиниринговых и производственных предприятиях.

**Ключевые слова:** трактор колесный, цистерна, работы транспортные, колебания, свободная поверхность жидкости, динамика движения, плавность хода, динамические нагрузки, ходовая система.

**Kozhushko A.P.** Dynamic analysis and methods for improving the smoothness of a wheeled tractor when transporting liquid cargo. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.22.02 – automobiles and tractors (13 – Mechanical engineering, 27 – Transport). – National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2021

The thesis is devoted to solving a scientific and applied problem to improve the dynamic properties of the movement of tractors when transporting liquid in agricultural tanks by determining rational schemes and design parameters of the MTA to reduce the negative effect of low-frequency oscillations of the surface layer of the liquid in the tank on the smoothness of the tractor.

The conditions that affect the dynamic component of the movement of tractors when transporting liquid in agricultural tanks are analyzed. The principles of taking into account the motion of the free surface of a liquid in a closed container are considered. The analysis of oscillatory processes of a complex mechanical system "tractor - tank" is carried out. The outlined methodology of a new approach for determining the oscillatory motion of a liquid in a closed container with a free surface. A dynamic analysis of the rectilinear movement of a wheeled tractor with a tank car during transport operations is carried out. The spectral phenomena that extend the theory of oscillations are highlighted. The influence of the kinematic and power disturbance on the "tractor - tank" system is estimated, in particular, the conditions for the occurrence of parametric resonance are highlighted. The adequacy of mathematical algorithms for determining the dynamic characteristics of wheeled tractors with tanks has been experimentally proved. The given promising methods for improving the dynamic properties of a wheeled tractor, based on the determination of rational schemes and design parameters of the MTA in order to reduce the negative effect of low-frequency oscillations of the surface layer of the liquid in the tank.

The main scientific provisions, developments and recommendations for implementation at engineering and manufacturing enterprises proposed in the dissertation.

**Key words:** wheeled tractor, tank, transport work, vibrations, free surface of liquid, motion dynamics, smoothness of motion, dynamic loads, running system.

## УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ


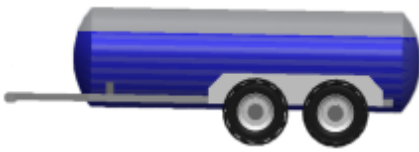

**АЧХ** – амплітудно-частотна характеристика;

**ФЧХ** – фазово-частотна характеристика;

**ЛДЗ** – логарифмічний декремент загасання коливань;

**МТА** – машинно-тракторний агрегат з колісним трактором і цистерною;

**НПЦ** – напівпричіпна односекційна тракторна цистерна;

		
ВНЦ-6	МЖТ-10	ВНЦ-36

**ПЦ** – причіпна односекційна тракторна цистерна;

	
BSA-20	МЖТ-16

**ТЗП** – тягово-зчіпний пристрій

Підписано до друку «24» березня 2021 р.

Формат видання 134x215. Формат паперу 60x90/16. Папір офсет. Цифровий друк. Гарнітура Times New Roman. Обсяг авт. арк. 1,9. Наклад 100 прим.

Замовлення № 19

---

Надруковано у копії-цетрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФО-П Миронов М.В. Свідоцтво ВО №022953)

м. Харків, вул. Червопрапорна, 3 літер Б-1

тел. 7-170-354

[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)

