

Кожушко А.П.

Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»  
E-mail: Andreykozhusko7@gmail.com

**ВПЛИВ ПЕРЕМІННОЇ МАСИ РІДКОГО ВАНТАЖУ  
НА ДИНАМІЧНУ НАВАНТАЖЕНІСТЬ ХОДОВОЇ  
СИСТЕМИ ТРАНСПОРТОВАНИХ АГРЕГАТІВ**

УДК 629.1.02

DOI 10.37700/ts.2020.21.75-86

*Кожушко А.П. «Вплив перемінної маси рідкого вантажу на динамічну навантаженість ходової системи транспорттованих агрегатів»*

Постійне нарощування сільськогосподарської продукції змушує аграріїв використовувати в транспортних роботах, як автомобільну, так і тракторну техніку. Тому, створюючи нову тракторну техніку, виробники намагаються задовольнити експлуатаційні показники руху.

При дослідженні транспортної роботи, що використовується в агропромисловому комплексі спостерігається виникнення проблеми при русі колісного трактора з причіпними та/або напівпричіпними цистернами, які частково заповнені рідиною. Оскільки в тракторних цистернах відсутні внутрішні перегородки, тоді перевезення частково заповненої рідким вантажем цистерни призведе до виникнення суттєвих вільних коливань. Така тенденція разом з закономірним нарощуванням транспортної швидкості призводить до поздовжньої та поперечної нестабільності, що сприяє підвищенню як енергетичних витрат, так і аварійних ситуацій (відбувається вплив на плавність руху, керованість та стійкість транспортного засобу, підвищення динамічної навантаженості ходової системи, тощо).

Метою роботи є дослідження динамічної навантаженості ходової системи причіпної та напівпричіпної цистерни при виконанні транспортної роботи колісним трактором. Задля вирішення поставленої мети необхідно: оцінка динамічної навантаженості ходової системи агрегатів (тракторних цистерн) при виконанні транспортної роботи колісним трактором; виконати аналіз впливу конструктивних показників підвіски напівпричіпної цистерни з метою зменшення динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора. При вирішенні поставленої мети використовувалась методика, яка передбачала математичне моделювання повздовжнього руху колісного трактора з цистернами різного об'єму наповнення. Використана модель враховує перерозподіл рідини у цистерні, яка викликана коливаннями оболонки, з використанням характеристики поверхневих хвиль Релея. Проведення аналізу динамічної навантаженості ходової системи тракторних цистерн базувалося на визначенні сили, що створюється пневматичними шинами коліс.

Як результат, отримано дані теоретичного дослідження, які відображають вплив перерозподілу рідини в напівпричіпній цистерні на показник динамічної навантаженості ходової системи цистерн. Також встановлено, що для зменшення амплітуди динамічної навантаженості ходової системи напівпричіпної цистерни доцільно в конструкцію впроваджувати елементи демпфірування (амортизатори). При підборі пружних характеристик підвіски напівпричіпної цистерни необхідно проводити комплексне дослідження з визначення динамічної навантаженості на ходову систему, адже некоректний підбір жорсткості підвіски може призвести до потрапляння резонансної зони динамічної навантаженості в діапазон транспортних швидкостей руху.

**Ключові слова:** колісний трактор, напівпричіпна цистерна, ходова система, динамічна навантаженість, перемінна маса, навантаженість шин.

*Кожушко А.П. «Влияние переменной массы жидкого груза на динамическую нагруженность ходовой системы транспортируемых агрегатов»*

Постоянное наращивание сельскохозяйственной продукции заставляет аграриев использовать в транспортных работах, как автомобильную, так и тракторную технику. Поэтому, создавая новую тракторную технику, производители пытаются удовлетворить эксплуатационные показатели движения.

При исследовании транспортной работы, используется в агропромышленном комплексе наблюдается возникновение проблемы при движении колесного трактора с прицепами и/или полуприцепами цистернах, которые частично заполнены жидкостью. Поскольку в тракторных цистернах отсутствуют внутренние перегородки, тогда перевозки частично заполненной жидким грузом цистерны приведет к возникновению существенных свободных колебаний. Такая тенденция вместе с закономерным наращиванием транспортной скорости приводит к продольной и поперечной нестабильности, способствует повышению как энергетических затрат, так и аварийных ситуаций (происходит влияние на плавность движения, управляемость и устойчивость транспортного средства, повышение динамической нагруженности ходовой системы и т.д.).

Целью работы является исследование динамической нагруженности ходовой системы прицепной и полуприцепной цистерны при выполнении транспортной работы колесным трактором. Для решения поставленной цели необходимо: оценка динамической нагруженности ходовой системы агрегатов (тракторных цистерн) при выполнении транспортной работы колесным трактором; выполнить анализ влияния конструктивных показателей подвески полуприцепной цистерны с целью уменьшения динамической нагруженности ходовой системы колесного трактора. При решении поставленной цели использовалась методика, которая предусматривала математическое моделирование продольного движения колесного

трактора с цистернами различного объема наполнения. Использованная модель учитывает перераспределение жидкости в цистерне, которая вызвана колебаниями оболочки, с использованием характеристики поверхностных волн Рэлея. Проведение анализа динамической нагруженности ходовой системы тракторных цистерн базировалось на определении силы, создаваемой пневматическими шинами колес.

Как результат, получены данные теоретического исследования, отражающие влияние перераспределения жидкости в полуприцепные цистерны на показатель динамической нагруженности ходовой системы цистерн. Также установлено, что для уменьшения амплитуды динамической нагруженности ходовой системы полуприцепной цистерны целесообразно в конструкцию внедрять элементы демпфирования (амортизаторы). При подборе упругих характеристик подвески полуприцепной цистерны необходимо проводить комплексное исследование по определению динамической нагруженности на ходовую систему, ведь некорректный подбор жесткости подвески может привести к попаданию резонансной зоны динамической нагруженности в диапазон транспортных скоростей движения.

**Ключевые слова:** колесный трактор, полуприцепная цистерна, ходовая система, динамическая нагруженность, переменная масса, нагруженность шин.

*A.P. Kozhushko "Influence of variable weight of liquid cargo on dynamic loading of the running system of transported units "*

*The constant increase in agricultural production forces farmers to use both automobile and tractor machinery in transport work. Therefore, creating new tractor equipment, manufacturers are trying to meet performance.*

*In the study of transport work used in the agro-industrial complex, there is a problem with the movement of a wheeled tractor with trailer and / or semi-trailer tanks, which are partially filled with liquid. As there are no internal partitions in tractor tanks, then the transportation of a tank partially filled with liquid cargo will lead to significant free oscillations. This trend, together with the regular increase in transport speed leads to longitudinal and transverse instability, increases both energy costs and emergencies (there is an impact on smoothness, handling and stability of the vehicle, increasing the dynamic load of the chassis, etc.).*

*The aim of the work is to study the dynamic load of the running system of the trailer and semi-trailer tank when performing transport work with a wheeled tractor. To solve this goal it is necessary to: assess the dynamic load of the running system of units (tractor tanks) when performing transport work with a wheeled tractor; to carry out the analysis of influence of constructive indicators of a suspension bracket of the semi-trailer tank for the purpose of reduction of dynamic loading of a running system of a wheeled tractor. In solving this goal, a technique was used that provided mathematical modeling of the longitudinal movement of a wheeled tractor with tanks of different filling volumes. The model used takes into account the redistribution of liquid in the tank, which is caused by oscillations of the shell, using the characteristics of surface Rayleigh waves. The analysis of the dynamic load of the running system of tractor tanks was based on the determination of the force generated by the pneumatic tires of the wheels.*

*As a result, the data of the theoretical research reflecting influence of redistribution of liquid in semi-trailer tanks on an indicator of dynamic loading of a running system of tanks are received. It is also established that to reduce the amplitude of the dynamic load of the running system of the semi-trailer tank, it is advisable to introduce damping elements (shock absorbers) into the structure. When selecting the elastic characteristics of the suspension of a semi-trailer tank, it is necessary to conduct a comprehensive study to determine the dynamic load on the running system, because incorrect selection of the stiffness of the suspension can lead to a resonant zone of dynamic load in the range of transport speeds.*

**Keywords:** wheeled tractor, semi-trailer tank, running system, dynamic loading, variable mass, tire load.

### Актуальність проблеми

Сьогодні колісний трактор відіграє велику роль при роботі агропромислового комплексу, адже на нього покладається велика кількість операцій. Таких як транспортна, транспортно-технологічна та технологічна. За аналітичними даними на виконання транспортної роботи колісним трактором припадає від 30 до 50% від загального обсягу робіт. До транспортної роботи відноситься перевезення як твердого, так і рідкого вантажу. Оскільки перед аграріями України постійно стає завдання підвищення врожайності, то виникає необхідність систематичного внесення рідких органічних добрив, що в свою чергу збільшує перевезення рідких вантажів. Ще не так давно в сільськогосподарських підприємствах транспортна робота здійснювалась в більшій мірі за рахунок автомобільного транспорту, але з розвитком тракторної техніки цей відсоток поступово зменшується.

Це стало можливим за рахунок збільшення енергонасиченості сучасних тракторів. Аналізуючи продукцію відомих брендів тракторної техніки [1 – 2], відмічається, що переважна більшість тракторів відносяться до тягово-енергетичної концепції

енергонасиченості. Така тенденція дозволяє збільшувати вантажоперевезення та підвищувати транспортні швидкості руху.

Досліджуючи транспортну роботу з перевезення рідких вантажів відмітимо, що вона виконується в напівпричіпній та причіпній цистернах, які, на відмінно від автомобільних та залізничних, позбавлені внутрішніх перегородок, а враховуючи тенденції розвитку транспортної швидкості – це призводить до виникнення додаткових збурювальних ефектів, які впливають на динаміку руху транспортного засобу.

### Аналіз останніх досліджень

Колісний трактор при транспортуванні цистерн сприймає суттєві збуджувальні сили, особливо при неповністю заповненій рідиною цистерни [3]. При розгляді питань пов'язаних з визначенням динамічних характеристик об'єктів зі змінною масою зазвичай використовують два методи: визначення динамічних властивостей матеріальної точки змінної маси або до властивостей вантажу, який рухається з плином часу.

В роботі [4, 5] автори досліджують рух об'єкта зі змінною масою (маса змінюється за функцією експоненціального закону) та дією сили в'язкого лінійного опору. Автори досліджують об'єкт, як осцилятор, котрий можна використовувати при дослідженні транспортних або спеціальних машин, де маса їх вузлів змінюється в процесі роботи. Згідно з роботи [6] динаміку машин з механізмами змінної маси необхідно розглядати використовуючи принцип «застиглої» маси та вводячи реактивну силу. Автори [6] відмічають, що динаміку таких машин необхідно досліджувати, як багаторівневу механічну систему з урахуванням режимів їх функціонування. В роботі [7] автор досліджує раціональний режим експлуатації машинно-тракторного агрегату зі змінною масою шляхом оцінки динамічних втрат при прямолінійному русі виконання технологічної операції. Автор при формуванні математичного апарату використовує величину прирощування маси вантажу, що надає змогу якісно дослідити коливання швидкості руху та динамічну складову буксування.

Більш складний рух розглядає автор роботи [8], який досліджує транспортно-технологічну роботу машинно-тракторного агрегату при русі з тракторними цистернами. Математична модель руху зводиться до обчислення наступного рівняння

$$\bar{F} + \bar{K} + \bar{I} = m \cdot \frac{d\bar{v}}{dt} + \bar{\Phi},$$

де  $\bar{F}$  – рівнодіюча сила;

$\bar{K}$  – сила Коріолісу;

$\bar{I}$  – сила, яку складає прирощування маси об'єкта дослідження;

$\bar{\Phi}$  – сила, яка визначає відносне переміщення [8].

Окреслений підхід доцільно розглядати лише при дослідженні транспортно-технологічних робіт (збирально-транспортній або розподільчо-транспортній), оскільки математичний апарат передбачає зменшення маси за проміжок певного часу. Тому при дослідженні транспортної роботи, коли вантаж виконує роль лише перерозподілу мас цей метод використовувати не припустимо.

Другий метод базується на визначенні властивостей вантажу, який рухається з плином часу. Так в роботі [9] автори за допомогою математичного моделювання континуальної моделі низькочастотних коливань оболонки, використовуючи при цьому характеристики поверхневих хвиль Релея (частинних похідних) досягли перерозподілу мас в цистерні. А вже в роботі [10] континуальну модель замінили на дискретну модель, яка з достатньою для практики точністю може використовуватися в динамічній (нелінійній) моделі руху колісного трактора з агрегатом змінної маси.

### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є дослідження динамічної навантаженості ходової системи агрегатів перемінної маси (цистерн) при виконанні транспортної роботи колісним трактором. Розкриття поставленої мети досягається за рахунок вирішення наступних задач дослідження: оцінка динамічної навантаженості ходової системи агрегатів (тракторних цистерн) при виконанні колісним трактором транспортної роботи; виконати аналіз впливу конструктивних показників підвіски напівпричіпної цистерни з метою зменшення динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора.

### Методичний підхід в проведенні досліджень

Задля вирішення поставленої мети необхідно сформувати динамічну математичну модель позовжньо-кутового руху колісного трактора з напівпричіпною цистерною. На рис. 1, 2 наведено розрахункову схему транспортного засобу, що досліджується, де  $y_T$ ,  $y_1^M$ ,  $y_2^M$ ,  $y_K$ ,  $y_C$  – вертикальне переміщення остову (рамі), переднього та заднього мостів, кабіни, сидіння трактора;  $\varphi_T$ ,  $\varphi_K$  – кут нахилу остову трактора та кабіни;  $y_{II}$ ,  $y_3^M$ ,  $y_4^M$  – вертикальне переміщення платформи, першого та другого мостів причіпного агрегату;  $\varphi_{II}$  – кут нахилу причіпного агрегату;  $x_k^p$  – рух рідини, яка приймає участь в коливальному процесі;  $x_T$ ,  $x_{II}$  – позовжній рух трактора та причіпного агрегату;  $x_K$  – позовжній рух кабіни з сидінням;  $m_T$  – маса остову трактора (разом з двигуном та, для агрегату із причепом, половиною дишла);  $m_K$  – маса кабіни;  $m_C$  – маса сидіння (разом із трактористом),  $m_{II}$  – маса рами та оболонки цистерни (разом з дишлом або, для причепу, його половиною);  $m_k^p$  – маси поверхневих шарів рідини, де відбуваються низькочастотні коливання [10];  $m_1, \dots, m_4$  – маси мостів (разом із колесами);  $J_T^K$  – момент інерції моста трактора;  $J_m^{\partial\theta}$  – момент інерції маховика і валів двигуна;  $i_{тр}$  – передавальне відношення трансмісії від валу двигуна до осі колеса;  $r_k$  – радіус колеса трактора;  $J_T$ ,  $J_K$ ,  $J_{II}$  – моменти інерції при обертанні трактора (разом із мостами), кабіни (разом з трактористом) та цистерни (разом із рамою, мостами і рідиною) на кути  $\varphi_T$ ,  $\varphi_K$ ,  $\varphi_{II}$  відносно їх центрів мас;  $c_1^a, c_2^a, \dots, c_7^a$  – це жорсткість у вертикальному напрямку амортизаторів чи ресор мостів трактора і цистерни, опор кабіни, сидіння водія, відповідно;  $c_1^u, c_2^u, \dots, c_4^u$  – сумарна радіальна жорсткість шин на відповідному мосту трактора або цистерни;  $c_x^{\partial}$ ,  $c_y^{\partial}$  – жорсткість дишла у горизонтальному та вертикальному напрямках;  $c_k^p$  – коефіцієнти жорсткості зв'язку між шаром рідини та оболонкою цистерни, саме ці коефіцієнти використовуються у рівняннях низькочастотних коливань рідини [10];  $l_1 - l_6$  – це відстань від центру мас трактора або цистерни до їх мостів, опор кабіни, сидіння, відповідно;  $l_5^*$ ,  $l_6^*$ ,  $l_7^*$  – від центру мас кабіни до її опор і сидіння;  $l_T$ ,  $l_{II}$  – від точок з'єднання дишла до центру мас трактора та цистерни (для напівпричіп-цистерни точкою з'єднання є гак трактора);  $l_0$  – це довжина дишла;  $R_x$ ,  $R_y$  – позовжжня та вертикальна складова сили, яка прикладена до дишла з боку гаку трактора;  $f_1 - f_7$  – коефіцієнти демпфірування;  $f_1^u - f_4^u$  – сумарні коефіцієнти демпфірування шин на відповідному мосту трактора або цистерни.

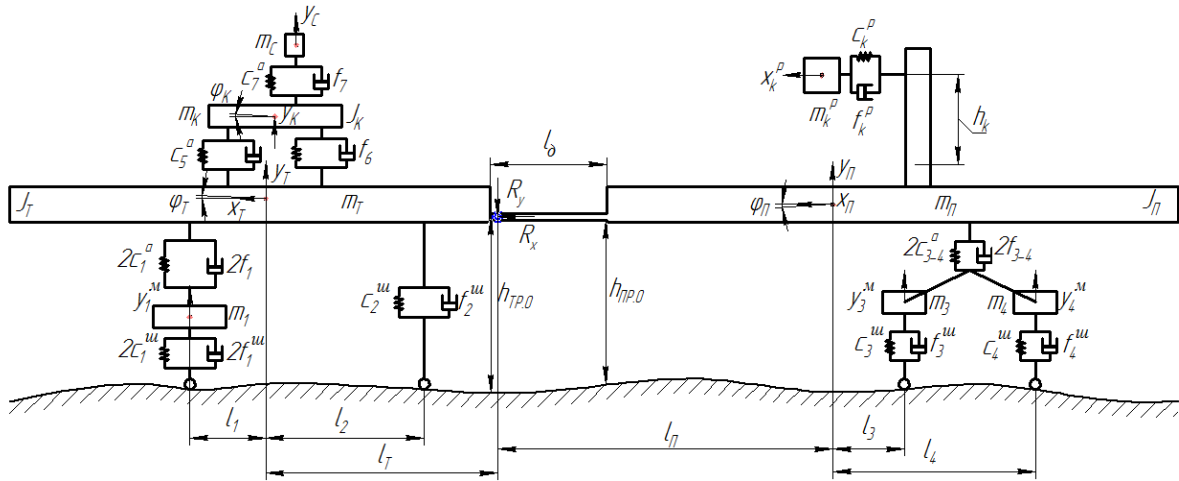


Рис. 1. Розрахункова схема трактора ХТЗ-150К з напівпричіпною цистерною

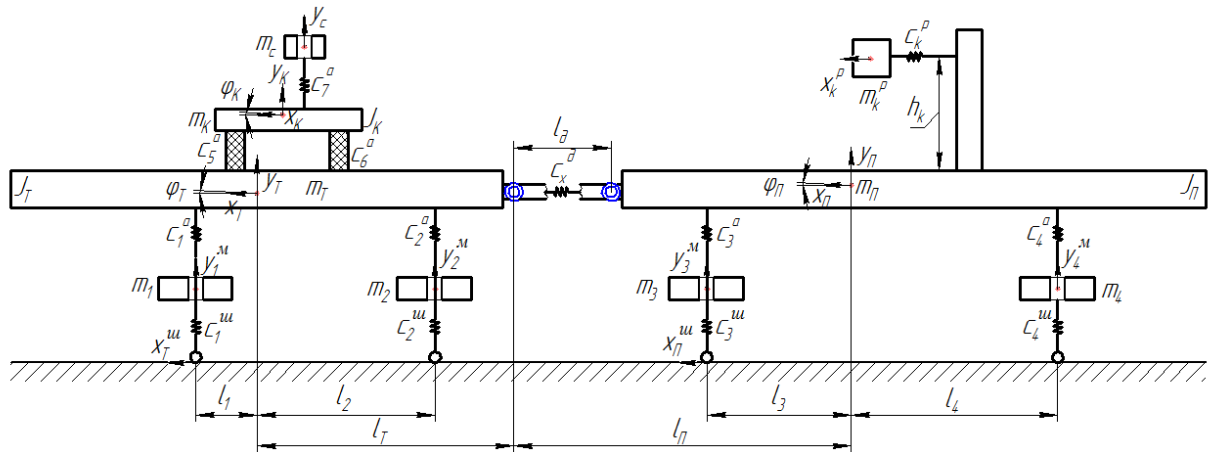


Рис. 2. Розрахункова схема трактора ХТЗ-150К з причіпною цистерною

Матеріали даної статті є продовження роботи [11], де автор отримав теоретичні дані, які відображають вплив перерозподілу рідини в напівпричіпній цистерні на показник динамічної навантаженості ходової системи трактора.

### Результати моделювання руху трактора з напівпричіпною цистерною

Оцінка впливу різної маси наповнення рідиною напівпричіпної цистерни на значення її динамічної навантаженості ходової системи проводиться для 3 вантажів: 10, 12 та 16 т. Результати моделювання для передньої вісі напівпричіпної цистерни (для задньої вісі результати варіюються в межах 1%) показані на рис. 3 – 5.

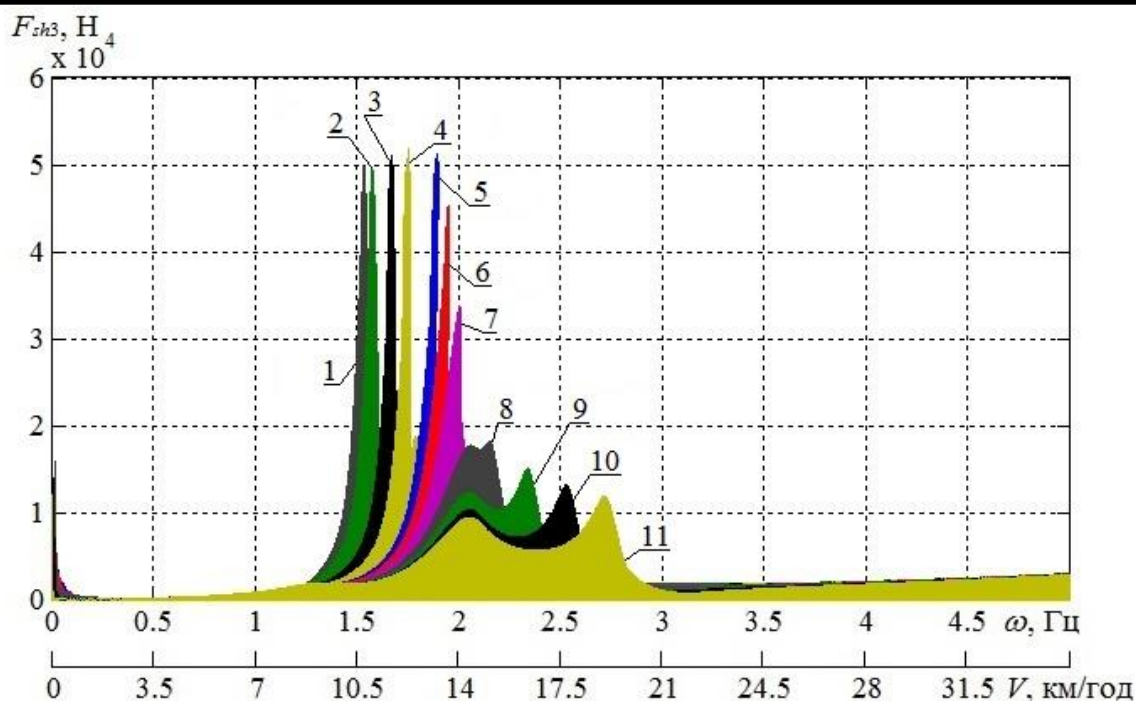


Рис. 3. АЧХ динамічної навантаженості ходової системи напівпричіпної цистерни 10т з різним рівнем наповненості:

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

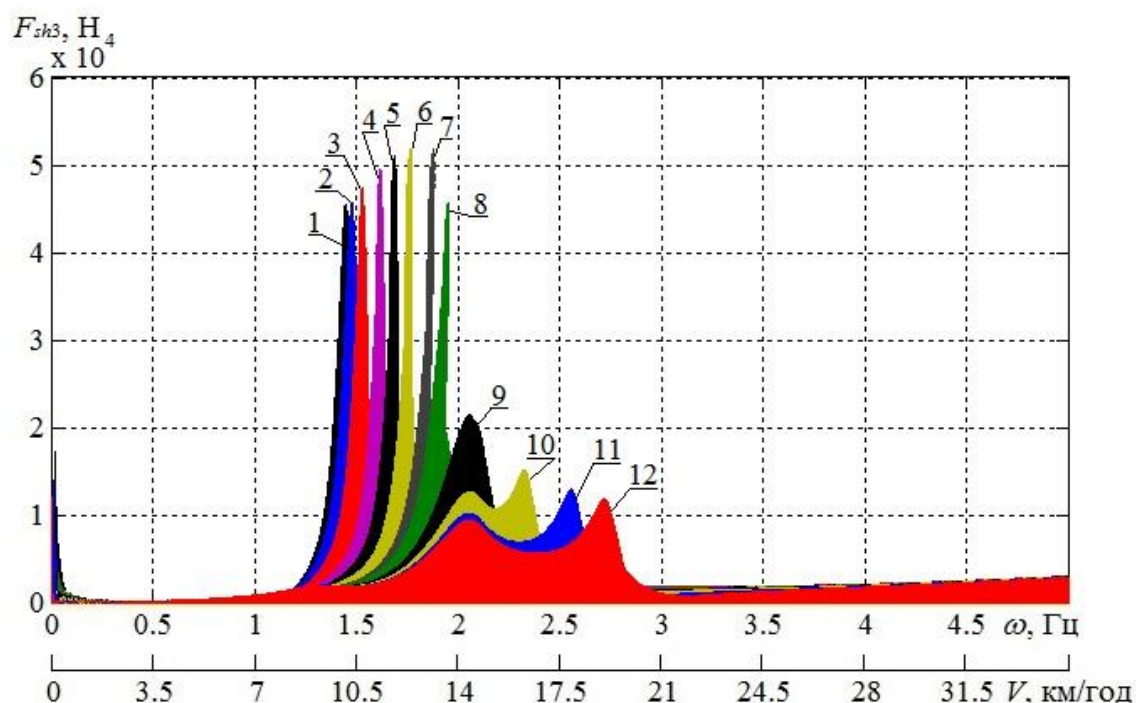


Рис. 4. АЧХ динамічної навантаженості ходової системи напівпричіпної цистерни 12т з різним рівнем наповненості:

1 –  $H = 1,7$  м; 2 –  $H = 1,53$  м; 3 –  $H = 1,36$  м; 4 –  $H = 1,19$  м; 5 –  $H = 1,02$  м; 6 –  $H = 0,85$  м; 7 –  $H = 0,76$  м; 8 –  $H = 0,68$  м; 9 –  $H = 0,51$  м; 10 –  $H = 0,34$  м; 11 –  $H = 0,17$  м; 12 –  $H = 0$  м

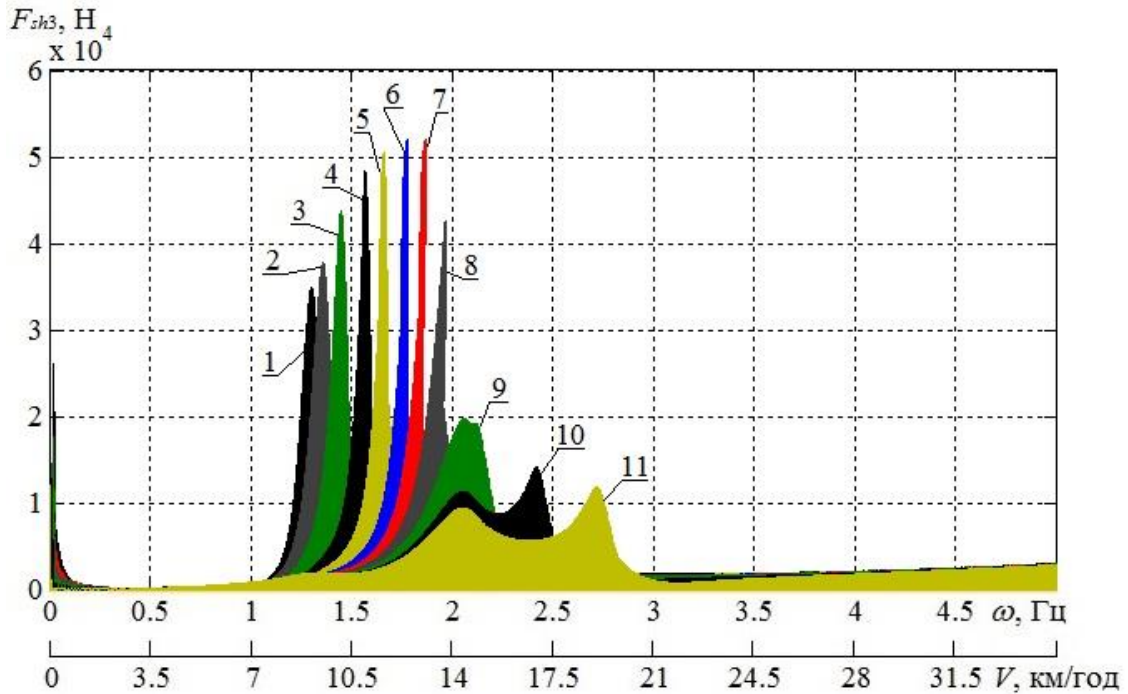


Рис. 5. АЧХ динамічної навантаженості ходової системи напівпричіпної цистерни 16т з різним рівнем наповненості:

1 –  $H = 1,9$  м; 2 –  $H = 1,6$  м; 3 –  $H = 1,35$  м; 4 –  $H = 1,1$  м; 5 –  $H = 0,95$  м; 6 –  $H = 0,8$  м; 7 –  $H = 0,7$  м; 8 –  $H = 0,6$  м; 9 –  $H = 0,45$  м; 10 –  $H = 0,25$  м; 11 –  $H = 0$  м

Аналізуючи залежності, встановимо, що з рівня рідини  $H = 0,5$  м (рис. 3),  $H = 0,51$  м (рис. 4) та  $H = 0,45$  м (рис. 5) спостерігається дія збурювальних сил, які направлені від трактора до напівпричіпної цистерни. Величина цих рівнів рідини характеризується зменшенням маси, тобто маса напівпричіпної цистерни менша за масу трактора.

Помічено, що пікові значення динамічної навантаженості ходової системи напівпричіпної цистерни спостерігаються на етапі вирівнювання мас напівпричіпного агрегату з масою транспортного засобу. Для більшої наочності визначимо процент динамічного навантаження шин  $\delta_{sh3}$  цистерни (рис. 6).

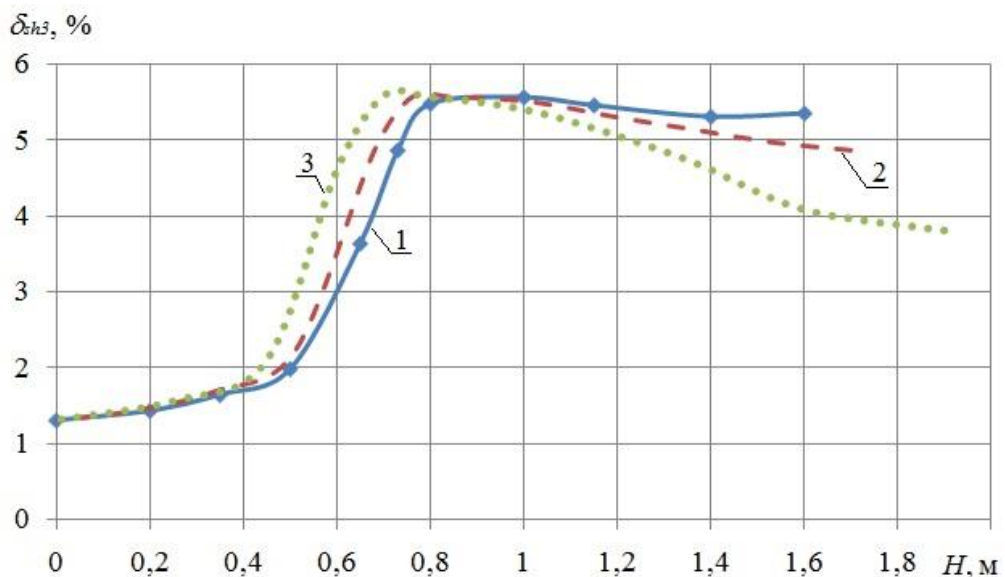


Рис. 6. Залежність проценту динамічного навантаження шин напівпричіпної цистерни з різним рівнем наповненості:

1 – для 10 т; 2 – для 12 т; 3 – для 16 т

Як видно з рис. 6, максимальний процент динамічного навантаження шин цистерни

становить 5,6% у випадку вирівнювання величин мас цистерни та трактора, що може призвести до максимальної зношеності шин напівпричіпної цистерни.

Великий вплив на показник, як плавності ходу трактора, так і динамічної навантаженості ходових систем трактора та напівпричіпного агрегату здійснює жорсткість підвіски цистерни. На рис. 7 показано зміну динамічної навантаженості ходової системи цистерни при варіюванні жорсткості підвіски.

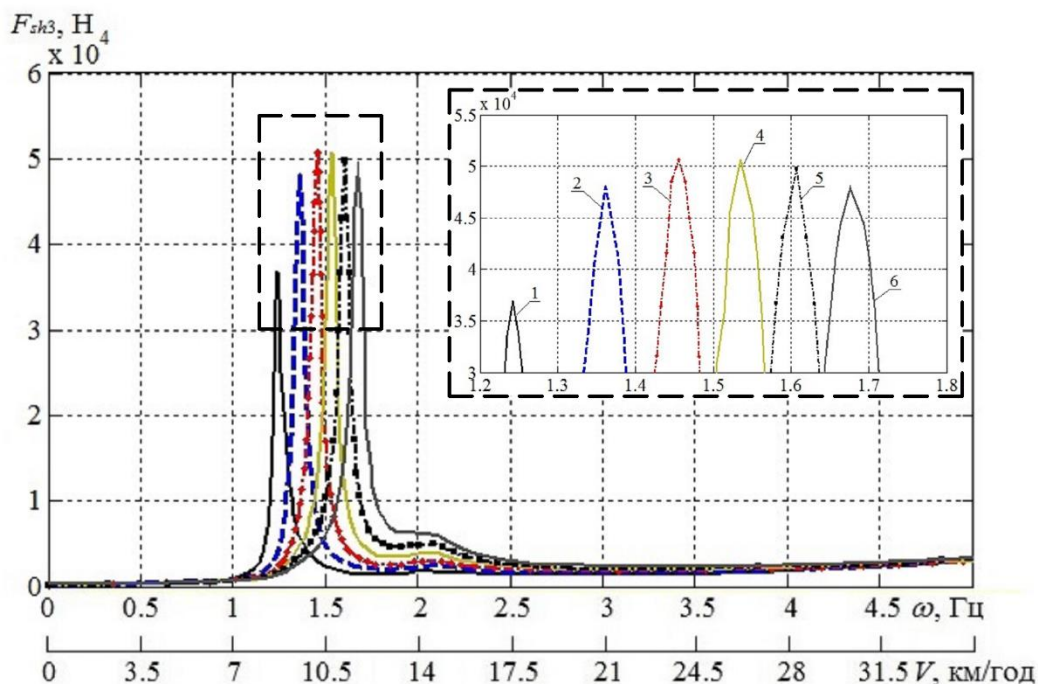


Рис. 7. АЧХ динамічної навантаженості ходової системи напівпричіпної цистерни 10т з різною жорсткістю підвіски  $c_3^a$  :

1 –  $c_3^a = 400$  кН/м; 2 –  $c_3^a = 500$  кН/м; 3 –  $c_3^a = 600$  кН/м; 4 –  $c_3^a = 700$  кН/м; 5 –  $c_3^a = 800$  кН/м; 6 –  $c_3^a = 900$  кН/м;

Як видно з рис. 7, залежно від обраної жорсткості резонансна зона дії напівпричіпного агрегату буде виникати на різній частоті зовнішнього впливу (швидкості руху). Як рекомендацію, можна рахувати те, що при  $c_3^a \geq 700$  кН/м резонансна зона дії напівпричіпного агрегату спостерігається поза технологічною швидкістю обробки (10 км/год). Зважаючи на отримані результати доцільно провести аналіз зміни жорсткості підвіски цистерни на ходову систему трактора (рис. 8).

З залежностей, які наведені на рис. 8, видно, що жорсткість підвіски напівпричіпної цистерни (вантажопідйомністю 10т)  $c_3^a = 400$  кН/м збільшує динамічну навантаженість передньої вісі колісного трактора, а  $c_3^a = 900$  кН/м – задньої. Тому для конкретної напівпричіпної цистерни (вантажопідйомністю 10т) рекомендовано мати жорсткість в діапазоні  $700 < c_3^a < 900$  кН/м.

Згідно з проведеним аналізом стає зрозуміло, що для кожної напівпричіпної цистерни, залежно від її конструктивних особливостей, необхідно окремо підбирати пружні характеристики підвіски. Але з практики відомо, що зменшення величини АЧХ можна досягнути впровадженням в підвіску демпфіруючих елементів.



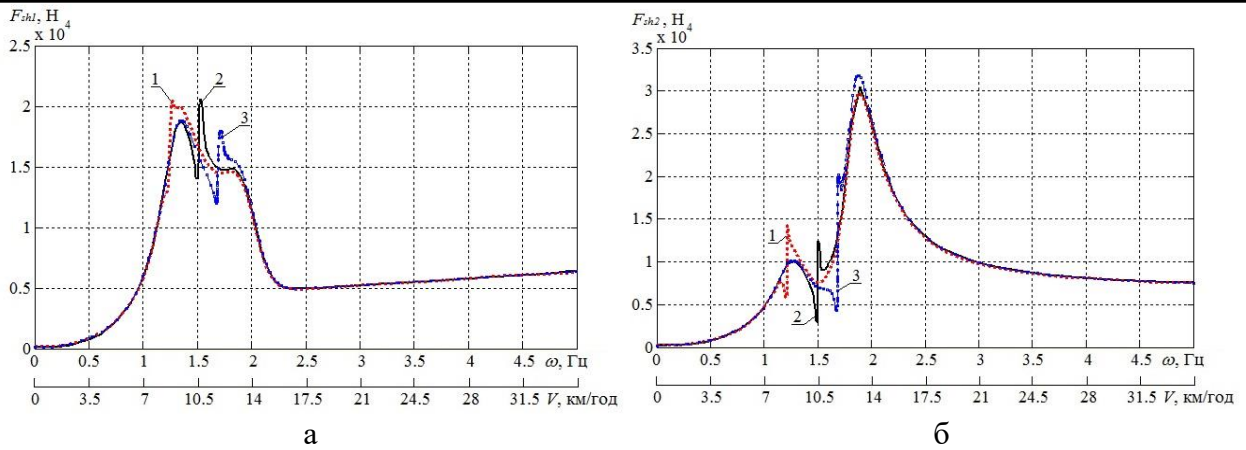


Рис. 8. АЧХ динамічної навантаженості ходової системи трактора при перевезенні цистерни 10т з різною жорсткістю підвіски  $c_3^a$  :  
 1 –  $c_3^a = 400$  кН/м; 2 –  $c_3^a = 700$  кН/м; 3 –  $c_3^a = 900$  кН/м

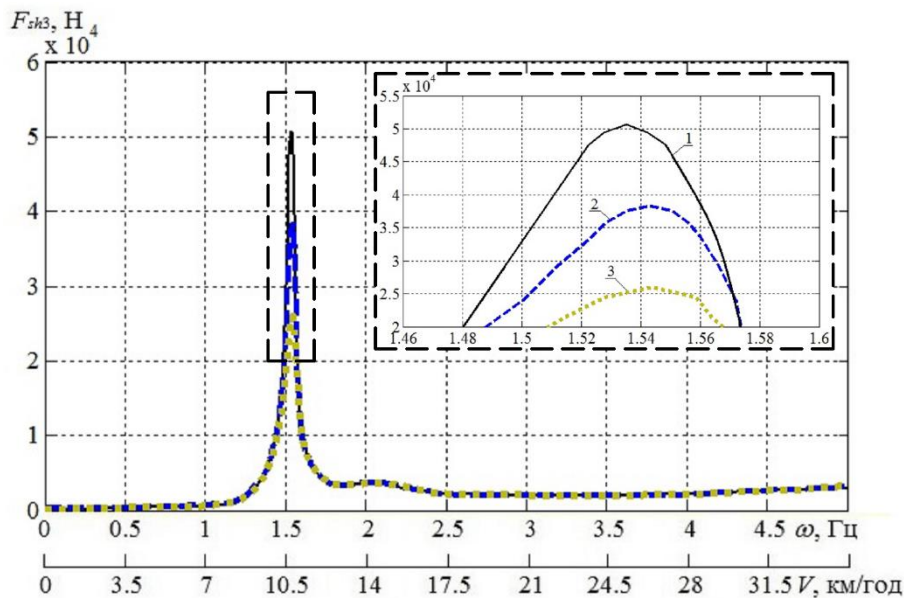


Рис. 9. АЧХ динамічної навантаженості ходової системи трактора при перевезенні цистерни 10т з різною величиною коефіцієнта демпфування підвіски  $f_3$  :  
 1 –  $f_3 = 0$  Нс/м; 2 –  $f_3 = 1$  кНс/м; 3 –  $f_3 = 2,5$  кНс/м

Як видно з рис. 9 встановлено, що впровадження демпфіруючих елементів в підвіску напівпричіпної цистерни дозволяє зменшити величину динамічної навантаженості ходової системи цистерни на 48,7% при  $f_3 = 2,5$  кНс/м. Зменшення динамічної навантаженості ходової системи напівпричіпного агрегату призведе до зменшення динамічної навантаженості ходової системи трактора.

### Результати моделювання руху трактора з причіпною цистерною

Як визначено раніше, причіпна цистерна не передає вертикальний коливальний вплив на колісний трактор, але сама здатна сприймати навантаження, тому доцільним є дослідження динамічної навантаженості ходової системи причіпної цистерни.

Оцінка впливу різної маси наповнення рідиною причіпної цистерни на значення її динамічної навантаженості ходової системи проводиться для 2 вантажів: 10 та 16 т. Результати моделювання показані на рис. 10 – 11.

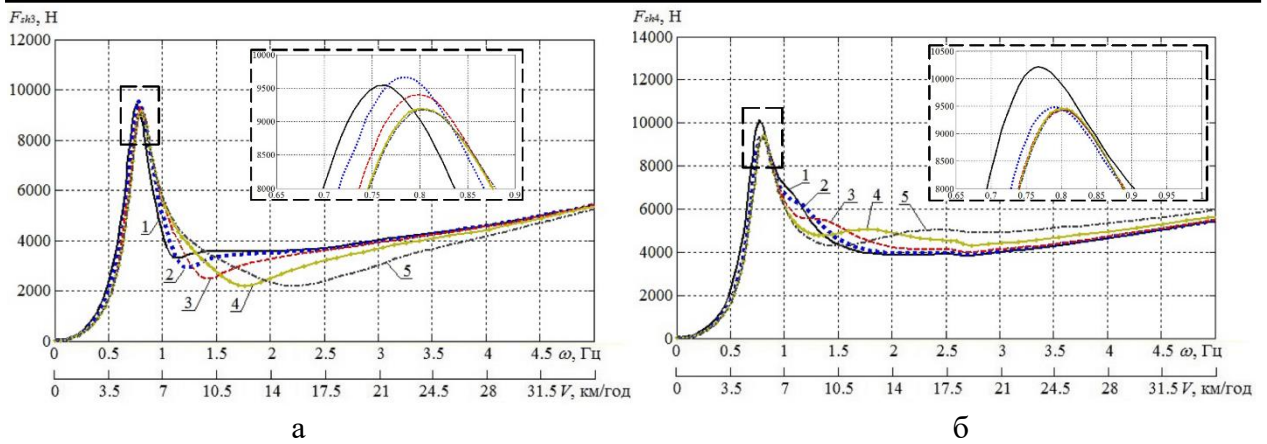


Рис. 10. АЧХ динамічної навантаженості ходової системи причіпної цистерни 10т з різним рівнем наповненості:  
 а – 10т; б – 16 т; 1 –  $H = 1,6$  м; 2 –  $H = 1,2$  м; 3 –  $H = 0,8$  м; 4 –  $H = 0,4$  м; 5 –  $H = 0$  м

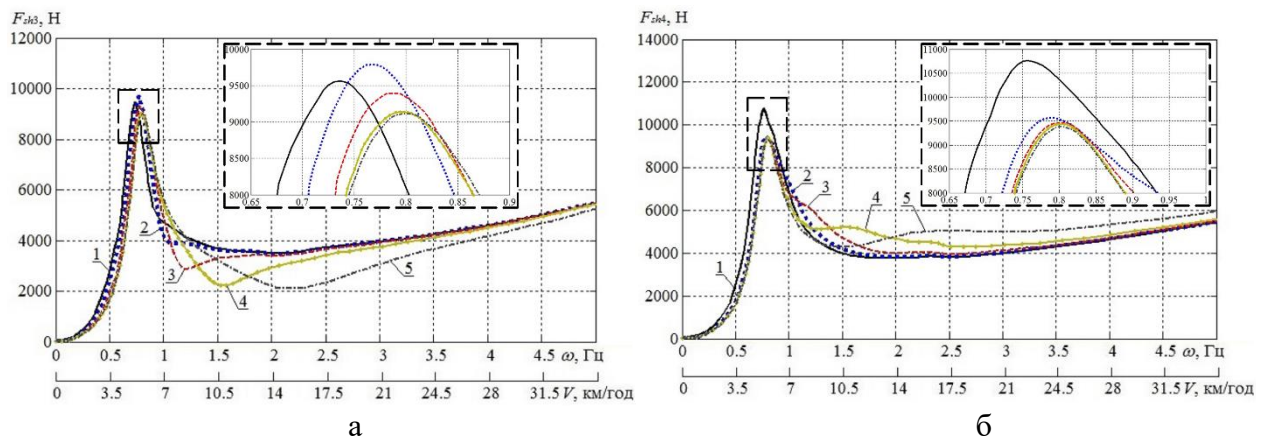


Рис. 11. АЧХ динамічної навантаженості ходової системи причіпної цистерни 16т з різним рівнем наповненості:  
 а – 10т; б – 16 т; 1 –  $H = 1,9$  м; 2 –  $H = 1,4$  м; 3 –  $H = 0,95$  м; 4 –  $H = 0,5$  м; 5 –  $H = 0$  м

З рис. 10 – 11, залежність динамічної навантаженості ходової системи причіпної цистерни від частоти зовнішнього впливу (швидкості руху трактора) має чітко виражену резонансну зону. Оцінюючи цю зону з резонансною зоною напівпричіпною цистерною, встановимо, що для причіпної – амплітуда резонансну значно менше. Резонансна зона для причіпної цистерни зміщена до  $0,7 - 0,85$  Гц ( $4,9 - 5,95$  км/год) і не потрапляє в діапазон технологічних та транспортних швидкостей.

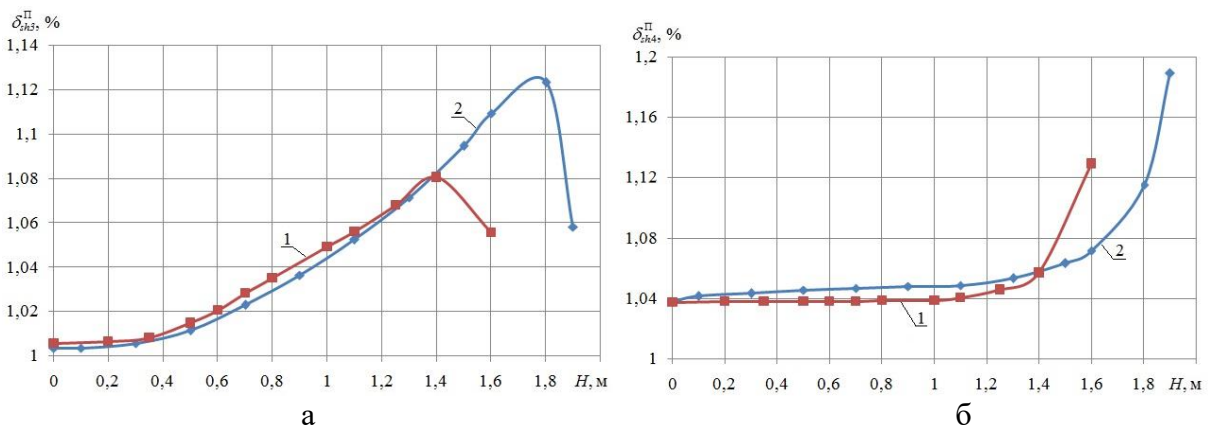


Рис. 12. Залежність проценту динамічного навантаження шин причіпної цистерни в резонансній зоні з різним рівнем наповненості:  
 а – передня вісь; б – задня вісь; 1 – для 10 т; 2 – для 16 т

На рис. 12 показано зміну процента динамічного навантаження шин передньої та задньої вісі причіпної цистерни в резонансній зоні. Максимальний процент динамічного навантаження шин для передньої вісі цистерни виникає не при максимальній наповненості рідиною цистерни, а в зоні при виникненні максимального моменту інерції рідини, що коливається. Підводячи підсумок, відмітимо, що величина процента динамічного навантаження шин  $\delta_{sh3}^{\Pi}$  та  $\delta_{sh4}^{\Pi}$  цистерни ледве перевищує 1%.

### Висновки

Встановлено, що ходова система напівпричіпної цистерни має більшу динамічну підпорядкованість від впливу вертикальних збурювальних сил. Розраховано максимальний процент динамічного навантаження шин напівпричіпної цистерни становить 5,6%. Визначено, що для зменшення амплітуди динамічної навантаженості ходової системи напівпричіпної цистерни доцільно в конструкцію впроваджувати елементи демпфірування. При підборі пружних характеристик підвіски напівпричіпної цистерни необхідно проводити комплексне дослідження з визначення динамічної навантаженості на ходову систему, адже некоректний підбір жорсткості підвіски може призвести до потрапляння резонансної зони динамічної навантаженості в діапазон транспортних швидкостей руху. Визначено, що вплив вертикального збурювального впливу на динамічну навантаженість ходової системи причіпної цистерни має не суттєвий вплив, що підтверджується процентом динамічної навантаженості шин, який знаходиться в діапазоні зміни 1 – 1,2%.

### Список використаних джерел

1. Лебедев, А.Т. Некоторые проблемы теории трактора тяговоэнергетической концепции, *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ*, 2012, с. 5-13.
2. Кожушко А.П. Аналіз конструктивних особливостей причіпних та напівпричіпних цистерн у складі машинно-тракторного агрегату, *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*, 2019, № 5 (1330), с. 34-40, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.05.
3. Kozhushko A., Riezva K. Comparison a running smoothness of a wheeled tractor with a semitrailer tank or unit while driving on asphalt-concrete surface, *Proceedings of the 3rd annual conference «Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions»*, 2019, p. 39-41, doi: 10.21303 / 2585-6847.2019.001038.
4. Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. Моделирование колебаний осциллятора линейнопеременной массы при импульсном нагружении, *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*, 2013, № 37(1010), с. 125-130.
5. Ольшанский В.П., Ольшанский С.В. Нестационарные колебания осциллятора при экспоненциальном изменении его массы, *Динамические системы*, 2014, Т. 3(31), № 3-4, с. 321-326.
6. Свитачев А.И., Разуваева А.С., Чекаев А.Н. Моделирование динамики тягово-транспортных машин с элементами конструкций переменной массы, *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*, 2012, № 1(33), с. 91-92.
7. Шуляк М.Л. Колебание скорости МТА переменной массы при установившемся режиме движения, *Motrol Commision of motorization and energetics in agriculture*, 2015, № 17(7), с. 23-29.
8. Калінін Є.І. Формування системних властивостей транспортно-технологічних агрегатів змінної маси : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.20 / Калінін Євген Іванович ; Харків. нац. автомоб.-дорож. ун-т. — Харків, 2019. — 40 с.
9. Кожушко А.П., Григор'єв О.Л. Математичне моделювання низькочастотних коливань в'язкої рідини в горизонтальній ємності з вільною поверхнею, *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*, 2018, № 3 (1279), с. 41-51.

10. Кожушко А.П., Григор'єв О.Л. Моделювання пов'язаних коливань колісного трактора та цистерни з рідиною на прямому шляху зі складним рельєфом, *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*, 2018, № 27 (1303), с. 34-61.

11. Кожушко А.П. Дослідження динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора з агрегатами змінної маси, *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*, 2019, № 205, с. 159-172.

### References

1. Lebedev A.T. 2012. Nekotoryie problemyi teorii traktora tyagovoenergeticheskoy kontseptsii , Mekhanizatsiia silskohospodarskoho vyrobnytstva: Visnyk KhNTUSH, pp. 5-13 [in Russian].

2. Kozhushko A.P. 2019. Analiz konstruktivnykh osoblyvostei prychipnykh ta napivprychipnykh tsystem u skladi mashynno-traktornoho ahrehatu, *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*, No. 5 (1330), pp. 34-40, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.05 [in Ukrainian].

3. Kozhushko A., Riezva K. Comparison a running smoothness of a wheeled tractor with a semitrailer tank or unit while driving on asphalt-concrete surface, *Proceedings of the 3rd annual conference «Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions»*, 2019, p. 39-41, doi: 10.21303 / 2585-6847.2019.001038.

4. Olshanskiy V.P., Olshanskiy S.V. 2013. Modelirovanie kolebaniy ostsillyatora lineynoperemennoy massyi pri impulsnom nagruzhennii, *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*, No. 37(1010), pp. 125-130. [in Russian].

5. Olshanskiy V.P., Olshanskiy S.V. 2014. Nestatsionarnyye kolebaniya ostsillyatora pri eksponentsialnom izmenenii ego massyi, *Dinamicheskie sistemyi*, Vol. 3(31), No 3-4, pp. 321-326. [in Russian].

6. Svitachev A.I., Razuvaeva A.S., Chekaev A.N. 2012. Modelirovanie dinamiki tyagovo-transportnykh mashin s elementami konstruktivnykh peremennoy massyi, *Sovremennyye tehnologii. Sistemnyy analiz. Modelirovanie*, No 1(33), pp. 91-92. [in Russian].

7. Shulyak M.L. 2015. Kolebanie skorosti MTA peremennoy massyi pri ustanovivshemsya rezhime dvizheniya, *Motrol Commision of motorization and energetics in agriculture*, No 17(7), pp. 23-29. [in Russian].

8. Kalinin Eu.I. 2019. Formuvannia systemnykh vlastyvostei transportno-tekhnolohichnykh ahrehativ zminnoi masy (*Doctoral dissertation, Minsk*). [in Ukrainian].

9. Kozhushko A. P., Grigiriev A. L. 2018. Matematychno modeliuвання nyzkochastotnykh kolyvan viazkoi ridyny v horyzontalnii yemnosti z vilnoiu poverkhneiu, *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*, No. 3 (1279), pp. 41-51 [in Ukrainian].

10. Kozhushko A. P., Grigiriev A. L. 2018. Modeliuвання poviazanykh kolyvan kolisnoho traktora ta tsystemy z ridynoiu na priamomu shliakhu zi skladnym reliefom, *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI»*, No. 27 (1303), pp. 34-61 [in Ukrainian].

11. Kozhushko A.P. 2019. Doslidzhennia dynamichnoi navantazhenosti khodovoi systemy kolisnoho traktora z ahrehatamy zminnoi masy, *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*, No. 205, pp. 159-172 [in Ukrainian].