

А. П. КОЖУШКО

АНАЛІЗ ВПЛИВУ АГРЕГАТУ ЗМІННОЇ МАСИ НА ПОКАЗНИКИ ПЛАВНОСТІ ХОДУ КОЛІСНОГО ТРАКТОРА

Дослідження плавності ходу колісних тракторів є сукупним показником, який враховує норми ергономічності та експлуатаційні транспортно-засобу. Тому дослідження плавності ходу є доцільним і актуальним. Особливий інтерес викликає дослідження руху колісного трактора з причіпними або напівпричіпними цистернами, які заповнені рідиною – за рахунок суттєвого впливу власних коливань рідини на рух цистерни. В зв'язку з цим виникає мета даної роботи – аналіз показників плавності ходу колісного трактора, який знаходиться в зчепці з агрегатом змінної маси. При вирішенні поставленої мети використовувалась методика, яка передбачала математичне моделювання повздовжньо-кутових коливань колісного трактора з агрегатом змінної маси. Використана модель враховує перерозподіл рідини у цистерні, яка викликана коливаннями оболонки, з використанням характеристики поверхневих хвиль Релея. Проведення аналізу показників плавності ходу колісного трактора базувалося на визначенні вертикальних прискорень сидіння оператора-водія та остова трактора. Як результат отримано дані теоретичного дослідження, які відображають вплив перерозподілу рідини в напівпричіпній цистерні на показники плавності ходу колісного трактора. Визначено, що при перевезенні рідкого вантажу вплив на показники плавності ходу колісного трактора більші, ніж при транспортуванні твердого вантажу. Також встановлено, що зміщення резонансної зони впливу напівпричіпного агрегату на вертикальні прискорення сидіння оператора при варіюванні висотою заповнення цистерни носить характер квадратичної функції, а саме параболи. Практична значимість роботи полягає у встановленні впливу конструктивних показників, а саме тиску в пневматичних шинах (трактора та цистерни), на значення показників плавності ходу трактора. Зниження величини вертикальних прискорень сидіння оператора досягається за рахунок зниження тиску в шинах. Але при зниженні тиску в шинах необхідно враховувати зміну техніко-економічних показників трактора. Тому перспективним подальшим дослідження, на думку автора, є вирішення питання оптимізації зменшення величини показників плавності ходу колісного трактора при русі з напівпричіпною цистерною з дотриманням техніко-економічних показників (витрати палива, продуктивності, тощо).

Ключові слова: колісний трактор, цистерна, коливання, плавність ходу, прискорення, перерозподіл мас.

А.П. КОЖУШКО

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АГРЕГАТА ПЕРЕМЕННОЙ МАССЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ ПЛАВНОСТИ ХОДА КОЛЕСНОГО ТРАКТОРА

Исследование плавности хода тракторов является совокупным показателем, который учитывает нормы эргономики и эксплуатации транспортного средства. Поэтому исследования плавности хода целесообразно и актуально. Особый интерес вызывает исследование движения колесного трактора с прицепами или полуприцепами-цистернами, которые заполнены жидкостью – за счет существенного влияния собственных колебаний жидкости при движении цистерны. В связи с этим возникает цель данной работы – анализ показателей плавности хода колесного трактора, который находится в сцепке с агрегатом переменной массы. При решении поставленной цели использовалась методика, которая предусматривала математическое моделирование продольно-угловых колебаний колесного трактора с агрегатом переменной массы. Использованная модель, которая учитывает перераспределение жидкости в цистерне, вызванное колебаниями оболочки, с использованием характеристики поверхностных волн Рэлея. Проведение анализа показателей плавности хода колесного трактора базировалось на определении вертикальных ускорений сиденья оператора-водителя и остова трактора. В результате получены данные теоретического исследования, отражающие влияние перераспределения жидкости в полуприцепной цистерне на показатели плавности хода колесного трактора. Определено, что при перевозке жидкого груза влияние на показатели плавности хода колесного трактора больше, чем при транспортировке твердого груза. Также установлено, что смещение резонансной зоны влияния полуприцепного агрегата на вертикальные ускорения сиденья оператора при варьировании высотой заполнения цистерны носит характер квадратичной функции, а именно парабола. Практическая значимость работы заключается в установлении влияния конструктивных показателей, а именно давления в пневматических шинах (трактора и цистерны), на значение показателей плавности хода трактора. Снижение величины вертикальных ускорений сиденья оператора достигается за счет снижения давления в шинах. Но при снижении давления в шинах необходимо учитывать изменение технико-экономических показателей трактора. Поэтому перспективным последующим исследованием, по мнению автора, является решение вопроса оптимизации уменьшения величины показателей плавности хода колесного трактора при движении с полуприцепной-цистерной с соблюдением технико-экономических показателей (расход топлива, производительности и т.д.).

Ключевые слова: колесный трактор, цистерна, колебания, плавность хода, ускорение, перераспределение масс.

A.P. KOZHUSHKO

ANALYSIS OF INFLUENCE THE VARIABLE MASS UNIT ON THE RUNNING SMOOTHNESS OF THE WHEELED TRACTOR

The study of the smooth running of tractors is an aggregate indicator that takes into account the norms of ergonomics and operation of the vehicle. Therefore, studies of smoothness are appropriate and relevant. Of particular interest is the study of the movement of a wheeled tractor with trailed or semi-trailer tanks that are filled with liquid - due to the significant influence of the natural oscillations of the liquid during the movement of the tank. In this regard, the goal of this work arises - the analysis of the smoothness of the wheel tractor, which is coupled to a variable mass unit. In solving this goal, a technique was used that provided for mathematical modeling of longitudinal-angular vibrations of a wheeled tractor with a variable mass unit. Used model, which takes into account the redistribution of liquid in the tank caused by vibrations of the shell, using the characteristics of Rayleigh surface waves. An analysis of the smoothness of the wheel tractor was based on the determination of the vertical accelerations of the driver's seat and tractor frame. As a result, theoretical research data were obtained that reflect the effect of fluid redistribution in a semitrailer tank on the smoothness of the wheel tractor. It was determined that when transporting liquid cargo, the effect on the smoothness of the wheel tractor is greater than when transporting solid cargo. It was also found that the shift of the resonance zone of the influence of the semitrailer unit on the vertical acceleration of the operator's seat with varying filling heights of the tank is a quadratic function, namely a parabola. The practical significance of the work is to establish the influence of design indicators, namely the pressure in the pneumatic tires (tractor and

tank), on the value of the smoothness of the tractor. Reducing the magnitude of the vertical acceleration of the operator's seat is achieved by reducing tire pressure. But with a decrease in tire pressure, it is necessary to take into account the change in the technical and economic indicators of the tractor. Therefore, a promising follow-up study, according to the author, is to address the issue of optimizing the reduction in the smoothness of the wheel tractor when driving with a semitrailer-tank in compliance with technical and economic indicators (fuel consumption, productivity, etc.).

Key words: wheeled tractor, tank, oscillation, smooth running, acceleration, mass redistribution

Вступ. Колісний трактор, сьогодні, використовується не тільки в аграрному секторі, а й в будь-якій галузі держави. Широкої популярності набула практика застосування тракторів при виконанні транспортної роботи, яка включає в себе перевезення причіпних та напівпричіпних агрегатів.

Перевезення вантажу в агропромисловому секторі зводиться до транспортування твердих та / або рідких вантажів. Великого інтересу викликає перевезення рідкого вантажу – це обумовлено виникненням суттєвих власних коливань рідини, які впливають на динаміку руху трактора. Тракторні цистерни мають від'ємність в порівнянні з автомобільними – це відсутність внутрішніх перегородок всередині цистерни (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Вид з середини тракторних цистерн:
а – Меррозет РН – 1/12А [1]; б – МЖТ-10

Така конструктивна особливість зумовлена меншою транспортною швидкістю тракторних перевезень, ніж автомобільних. Але сьогоднішня тенденція створення енергонасичених тракторів зумовила підвищення вантажоперевезень та збільшення транспортної швидкості руху.

Така тенденція стає основоположною при дослідженні ергономічних властивостей транспортних засобів. Окрім, підвищення швидкості

руху трактора великий вплив на ергономічні властивості здійснює розширення застосування комбінованих сільськогосподарських агрегатів, які потребують додаткової уваги з боку оператора. Відомо, що до узагальнених ергономічних показників сільськогосподарських тракторів відносяться [2]: зручність і ефективність керування; ефективність захисту оператора від впливу збурювальних факторів; зручність обслуговування. Також не слід нехтувати і тим, що збільшення енергонасиченості впливає і на експлуатаційні показники. А оскільки дослідження плавності ходу колісного трактора об'єднує в собі норми ергономічних і експлуатаційних показників, тоді встановлення здатності колісного трактора до пом'якшення та / або поглинання ударів (поштовхів і вібрацій), що виникають при зчіпці з агрегатом змінної маси є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Існує низька наукових робіт [3 – 8], присвячених розкриттю питань пов'язаних з плавністю ходу тракторів. Основоположним при цьому дослідженні є коливальний рух системи при дії зовнішніх збурювальних факторів. Великої уваги в цих роботах присвячено формуванню динамічної моделі коливального руху колісного трактора. Але в той же час жодним чином не охоплюється питання складного руху системи при зчіпці причіпним та / або напівпричіпним агрегатом. Тільки в роботах [9 – 11] автори надають алгоритм побудови динамічної моделі машинно-тракторного агрегату з напівпричіпним причепом. Наведена модель вигідно відрізняється від існуючих врахуванням складного руху в тягово-зчіпному пристрої. Але, на жаль, в жодній науковій літературі не встановлено вплив на плавність ходу колісного трактора при виконанні транспортної роботи з перевезення рідкого вантажу.

Врахування коливання рідини в замкнутій ємності вперше було досліджено за допомогою моделювання рівняння Мещерського І.В. [12] та формули Циолковського К.Е. [13]. Якщо відштовхуватись від впровадження в сільськогосподарський сектор, то відома робота [14], в якій автор описує рух точки змінної маси за трьома додатковими силовими факторами, що впливають на динамічні характеристики агрегату змінної маси в цілому. Але матеріали роботи [14] направлені на вирішення проблематики руху транспортно-технологічного агрегату, тобто не замкнутої ємності.

Оскільки транспортна робота з агрегатом змінної маси має на увазі перевезення рідкого вантажу в замкнутій ємності, тоді доречно скористатися роботами [15 – 16]. Де математичний

опис руху рідини відбувається за допомогою математичного моделювання поверхневих хвиль Релея, тобто частинних похідних (континуальна модель). Потім за рахунок перетворення в загальну дискретну модель запропоновано обчислювати коливання рідини за рахунок введення парціальних осциляторів, які мають свій розмір та вагу.

Мета дослідження, постановка задачі. Метою даної роботи є аналіз показників плавності ходу колісного трактора, який знаходиться в зчіпці з агрегатом змінної маси.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- навести методичні вказівки до формування динамічної моделі повздожньо-кутового руху колісного трактора з напівпричіпною цистерною;
- виконати порівняльний аналіз впливу на показники плавності ходу колісного трактора

виконання транспортної роботи з перевезення твердого і рідкого вантажу;

- навести практичні рекомендації щодо зменшення величини показників плавності ходу при перевезенні рідкого вантажу цистернами.

Методичні вказівки при побудові динамічної моделі повздожньо-кутового руху трактора з агрегатом змінної маси. Вирішення задач пов'язаних з розкриттям питання плавності ходу будь-якого транспортного засобу базується на формуванні динамічної моделі. Достатнім вважається імітація повздожньо-кутового руху транспортного засобу. На рис. 1 представлено розрахункову схему колісного трактора з напівпричіпним агрегатом змінної маси.

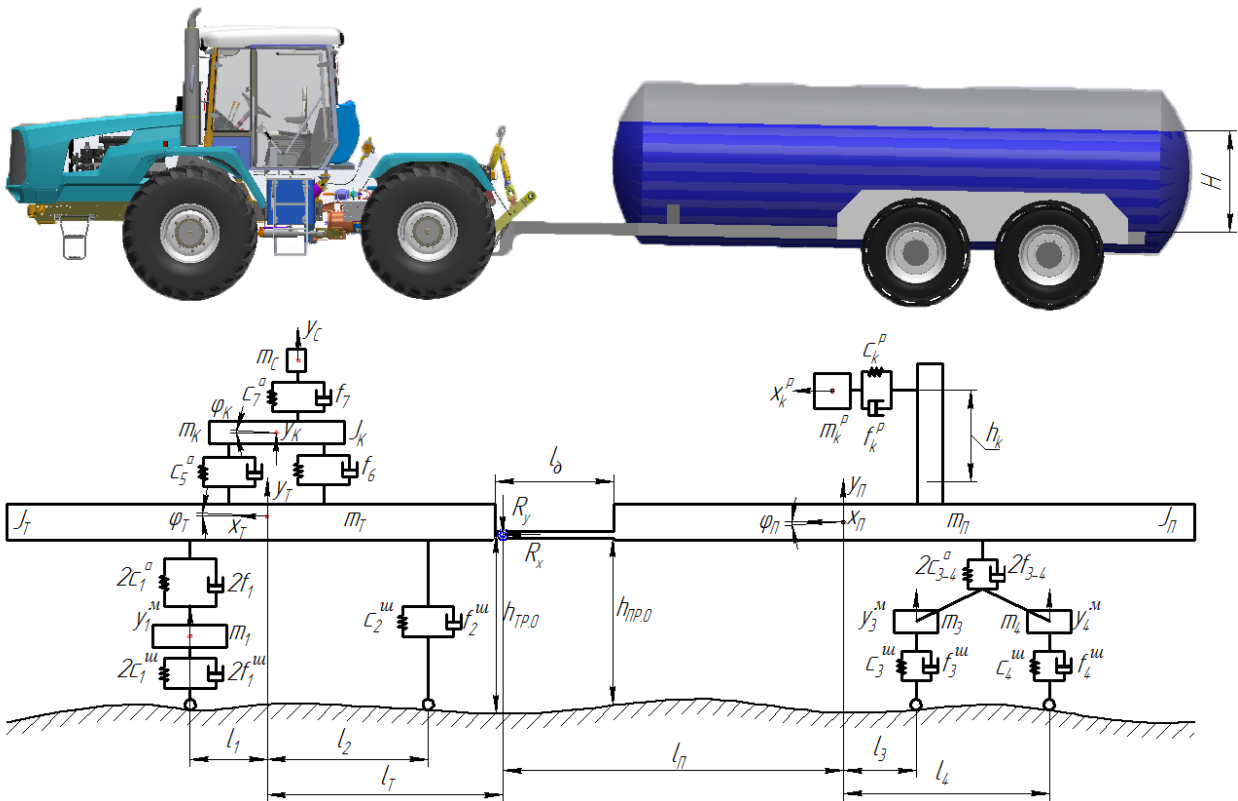


Рис. 2. Розрахункова схема трактора ХТЗ-150К з напівпричіпною цистерною МЖТ-10

На рис. 2 представлено y_T, y_1^M, y_2^M, y_K – вертикальне переміщення остову (рамі), переднього y_C о та заднього мостів, кабіни, сидіння трактора; φ_T, φ_K – кут нахилу остову трактора та кабіни; y_{Π}, y_3^M, y_4^M – вертикальне переміщення платформи, першого та другого мостів напівпричіпного агрегату; φ_{Π} – кут нахилу напівпричіпного агрегату; x_k^p – рух рідини, яка

приймає участь в коливальному процесі; x_T, x_{Π} – повздожній рух трактора та напівпричіпного агрегату; x_K – повздожній рух кабіни з сидінням; m_T – маса остову трактора; m_K – маса кабіни; m_C – маса сидіння (разом із трактористом), m_{Π} – маса рами напівпричепа та оболонки цистерни; m_k^p – маси поверхневих шарів рідини, де відбуваються низькочастотні коливання [15]; m_1, \dots, m_4 – маси

мостів (разом із колесами); J_T^k – момент інерції моста 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 жорсткості у вертикальному напрямку амортизаторів чи ресор мостів трактора і цистерни, опор кабіни, сидіння водія, відповідно; $c_1^u, c_2^u, \dots, c_4^u$ – сумарні радіальні жорсткості шин на відповідному мосту трактора або цистерни; c_x^d, c_y^d – жорсткості 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 [15]; $l_1 - l_6$ – 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_d – це довжина дишла; R_x, R_y – повздожня 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.

При формуванні математичної моделі повздожньо-кутового руху транспортного засобу велику роль відіграє функція зміни мікропрофіля дорожнього покриття. Цю функцію можливо реалізувати, як найбільш наближену к реальним умовам експлуатація [17], так і ту, яка реалізує максимально несприятливі умови

$$y_{TP1} = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot x_T}{\Delta A}\right); \quad (1)$$

$$y_{TP2} = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi(x_T - (l_1 + l_2))}{\Delta A}\right); \quad (2)$$

$$y_{TP3} = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi(x_T - (l_1 + l_{TP} + l_d + l_{TP} - l_3))}{\Delta A}\right); \quad (3)$$

$$y_{TP4} = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi(x_T - (l_1 + l_{TP} + l_d + l_{TP} + l_4))}{\Delta A}\right); \quad (4)$$

де A – амплітуда мікроколивань нерівностей; x_T – переміщення транспортного засобу; ΔA – довжина хвилі мікроколивань.

Опис коливання рідини в цистерні базується на методі, який наведено в роботах [15, 16], де автори встановлюють власні частоти ν_k , параметри жорсткості c_k^p та коефіцієнти демпфірування f_k^p коливань k -го парціального осцилятора

$$\nu_k = \frac{1}{2\pi} \sqrt{(g + \ddot{y}_{II}) \cdot \left(\pi \cdot \frac{k-0,5}{L}\right) \cdot th\left(h \cdot \left(\pi \cdot \frac{k-0,5}{L}\right)\right)}; \quad (5)$$

$$c_k^p = m_k^p \cdot (g + \ddot{y}_{II}) \cdot \left(\pi \cdot \frac{k-0,5}{L}\right) \cdot th\left(h \cdot \left(\pi \cdot \frac{k-0,5}{L}\right)\right); \quad (6)$$

$$f_k^p = 2d_p \cdot \nu_k \cdot m_k^p, \quad (7)$$

де k – номер парціального осцилятора; L – відстань від центру до краю цистерни; d_p – логарифмічний декремент затухання.

Для досліджуваної моделі напівпричіпної цистерни МЖТ-10 на рис. 3 представлено зміну параметрів жорсткості та коефіцієнтів демпфірування залежно від рівня наповненості.

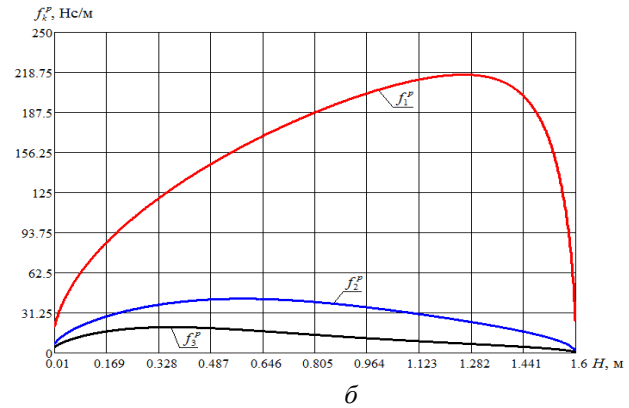
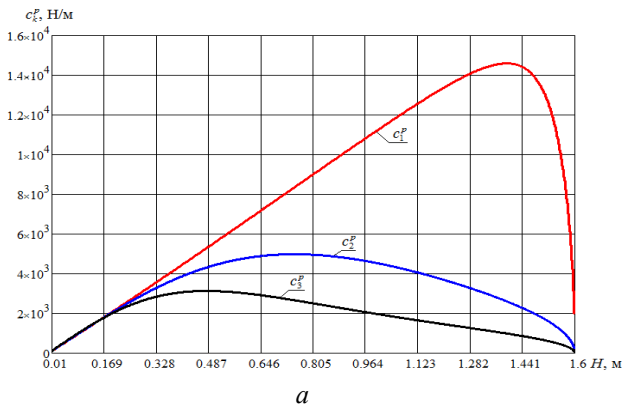


Рис. 3. Жорсткість (а) і коефіцієнт демпфірування (б) рідини в цистернах типу МЖТ-10 при коливаннях її оболонки у площині головного вертикального перерізу

Наступним кроком отримані залежності (6, 7) підставляються в рівняння для отримання сили та моментів сил, які діють на раму цистерни

$$P_{B\Sigma} = \sum_{k=1}^3 \left[f_k^p \cdot (\dot{x}_{\Pi} - \dot{x}_k^p) + c_k^p \cdot (x_{\Pi} - x_k^p) + G_k \cdot \varphi_{\Pi} \right]; \quad (8)$$

$$M_{B\Sigma} = \sum_{k=1}^3 \left[f_k^p \cdot (\dot{x}_{\Pi} - \dot{x}_k^p) + c_k^p \cdot (x_{\Pi} - x_k^p) + G_k \cdot \varphi_{\Pi} \right] \cdot h_k, \quad (9)$$

де h_k^p – відстань між центрами мас поверхневого шару та цистерни [16].

Представлені основні методичні викладки, за допомогою яких можливо виконати математичне моделювання динамічної моделі повздовжньо-кутового руху трактора з агрегатом змінної маси.

Порівняння значень плавності ходу при транспортуванні твердого і рідкого вантажу. Визначення значень плавності ходу транспортного засобу базується на побудові амплітудно-частотної характеристики вертикальних прискорень сидіння оператора-водія залежно від частоти зовнішнього збурення ω .

При порівнянні значень плавності руху при виконанні транспортної роботи з перевезення твердого і рідкого вантажу, як об'єкти досліджень використовувались напівпричіпні агрегати ППТС-10 та МЖТ-10. Колісний трактор марки ХТЗ-150К.

На рис. 3 представлено залежність вертикальних прискорень сидіння оператора-водія та остову трактора залежно від частоти зовнішнього збурення. Також для більшої наочності впливу перерозподілу мас в агрегаті змінної маси на рис. 4 наведено залежності кутових прискорень остову трактора.

Аналізуючи дані з рис. 3, 4 відмітимо, що на амплітудно-частотних характеристиках (АЧХ) чітко відображені резонансні зони впливу переднього

моста ω_1 , напівпричіпного агрегату ω_2 (ω_2') та остова трактора ω_3 .

Встановлено, що при перевезенні рідкого вантажу резонансна зона дії напівпричіпного агрегату зміщується (відносно тієї ж зони при транспортуванні твердого вантажу) в бік резонансної зони переднього моста на 3,2%.

При дослідженні величин вертикальних прискорень сидіння оператора (рис. 3а) встановлено, що зіставляючи АЧХ при перевезенні твердого з рідким вантажем спостерігається збільшення:

- в зоні переднього моста на 2,2%;
- в зоні напівпричіпного агрегату на 8%;
- в зоні остова трактора на 5,7%.

Така ж само тенденція до збільшення величин прискорень спостерігається і при дослідженні вертикальних та кутових прискорень остова трактора.

Різномірне заповнення цистерни. Як відомо в процесі експлуатації колісний трактор при перевезенні рідкого вантажу може рухатися по дорогам з різним рівнем наповненості. Такий характер руху зумовлює до виникнення додаткових збурювальних коливань в агрегаті змінної маси.

Дослідження плавності ходу з різномірним заповненням цистерни буде проводитися при

$H \in (0,8; 1,6)$ м. Обґрунтування такого вибору значень обумовлено тим, що найбільший вплив на колісний трактор відбувається коли маса агрегату більша за масу самого трактора.

На рис. 5 представлено результати залежності вертикальних прискорень сидіння оператора від частоти зовнішнього збурення при різному рівні наповненості цистерни. В табл. 1 зведено результати дослідження зміни величини вертикальних прискорень сидіння оператора в резонансних зонах дії переднього моста, напівпричіпного агрегату та остова трактора.

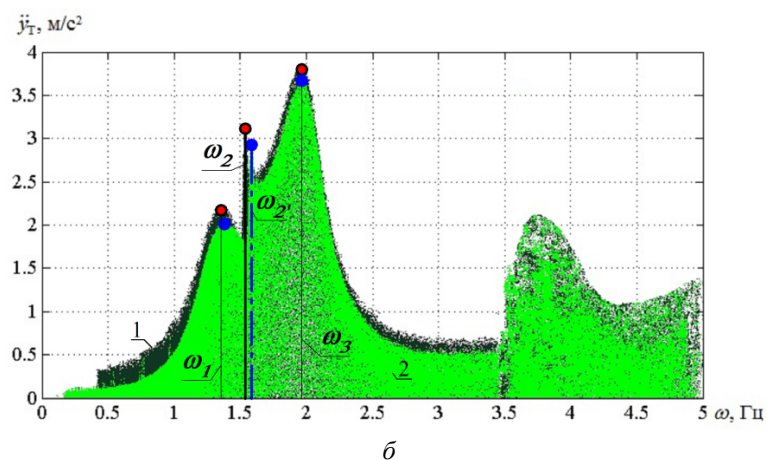
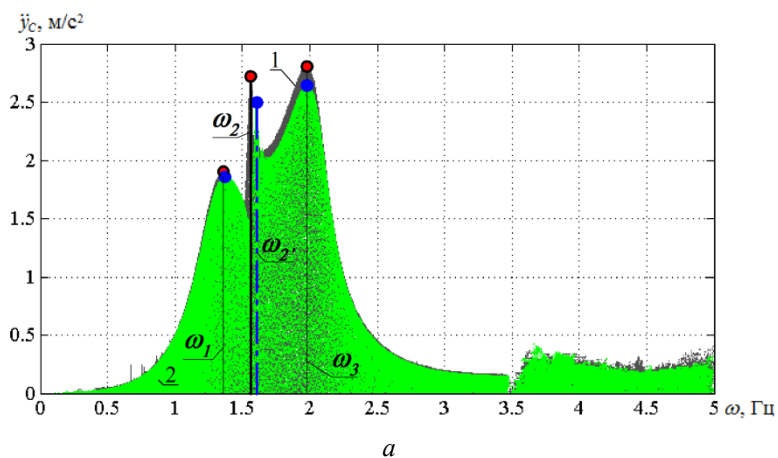


Рис. 3. Залежність вертикальних прискорень від частоти зовнішнього збурення: a – сидіння оператора; b – остова трактора; 1 – рідкий вантаж; 2 – твердий вантаж

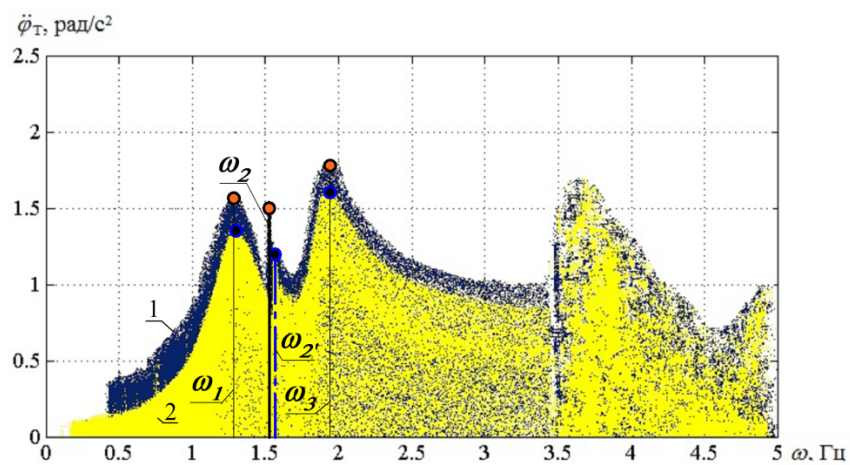


Рис. 4. Залежність кутових прискорень остова трактора від частоти зовнішнього збурення: 1 – рідкий вантаж; 2 – твердий вантаж

Таблиця 1 – Зміна величини вертикальних прискорень сидіння оператора в резонансних зонах при різнорівневному наповненні цистерни

Параметри	Результати моделювання						Різниця величин при зіставленні параметрів з $H=0,8$ м і $H=1,6$ м
	0,8	1,0	1,15	1,3	1,45	1,6	
Передній міст							
ω_1 , Гц	1,4	1,39	1,38	1,37	1,36	1,35	3,6%
\ddot{y}_C , м/с ²	2	1,99	1,97	1,95	1,93	1,91	4,5%
Напівпричіпний агрегат							
ω_2 , Гц	2,04	2	1,98	1,97	1,965	1,96	3,9%
\ddot{y}_C , м/с ²	2,39	2,68	2,76	2,79	2,8	2,81	17,6%
Остов трактора							
ω_3 , Гц	1,87	1,73	1,69	1,63	1,58	1,56	16,6%
\ddot{y}_C , м/с ²	2,88	2,18	2,15	2,4	2,62	2,73	5,2%

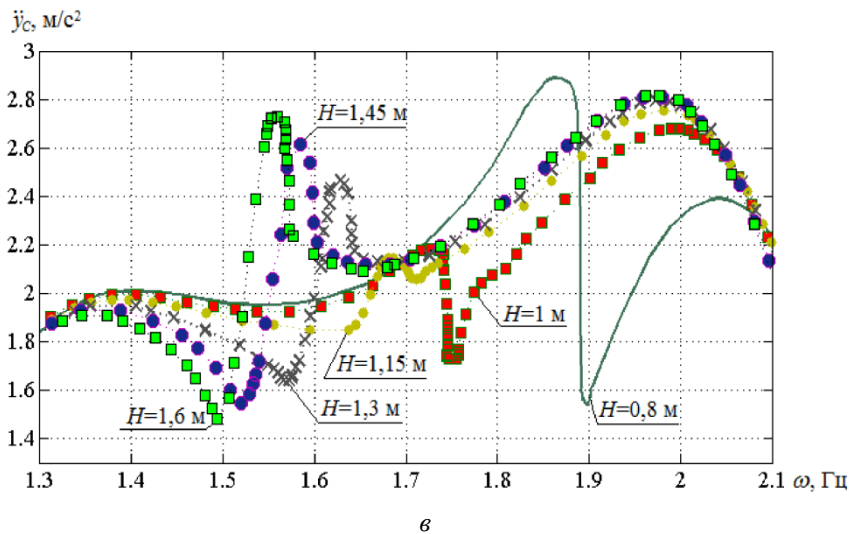
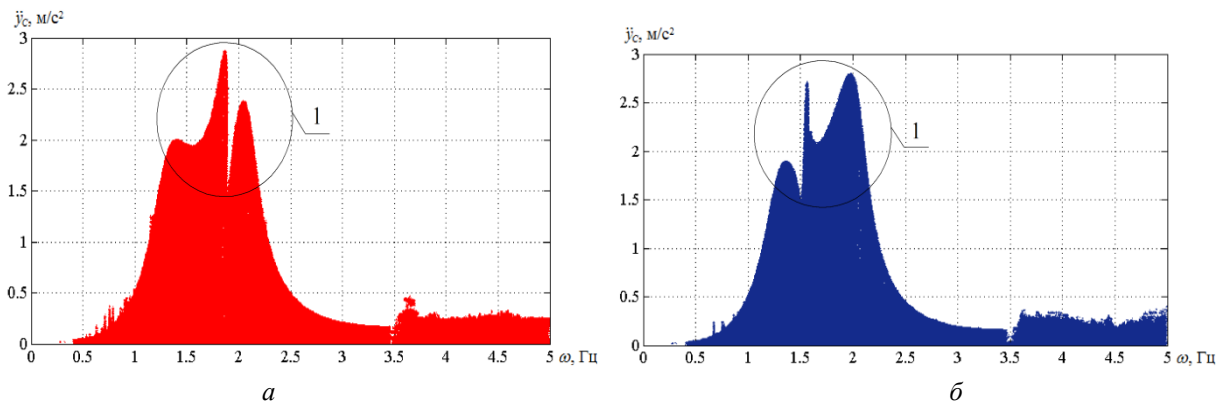


Рис. 5. Залежність вертикальних прискорень сидіння оператора від частоти зовнішнього збурення: а – при $H=0,8$ м; б – при $H=1,6$ м; в – ділянка дії напівпричіпного агрегату; 1 – ділянка досліджень

Відмітимо, що зміна резонансної зони впливу напівпричіпного агрегату на вертикальні прискорення сидіння оператора при варіюванні висотою заповнення цистерни від 0,8 до 1,6 м змінюється за квадратичною функцією (параболою).

Практичні рекомендації щодо зменшення величини плавності ходу трактора. Одним з відомих шляхів зменшення вертикальних прискорень на сидінні оператора є модернізація пружних та демпфіруючих властивостей

підресорених мас переднього моста [10], характеристик кабіни та сидіння оператора [18]. Основними напрямками модернізації є впровадження пневматичних або гідравлічних систем підресорювання. Але такі конструктивні рішення – коштовні та трудомісткі. Тому доцільно провести дослідження з варіювання показників, які потребують мінімальної витрати коштів та людських ресурсів – зменшення тиску в пневматичних шинах.

На рис. 6 наведено залежність вертикальних прискорень від частоти зовнішнього збурення при варіюванні показників тиску в тракторних шинах передньої і задньої осі. Відомо, що на досліджуваному тракторі ХТЗ-150К встановлюються

радіальні шини 23,1R26 виробництва «Россава». Рекомендовано заводом виробником рухатися по асфальтобетонній поверхні при тиску в шинах $p_{sh1} = 160$ кПа і $p_{sh2} = 140$ кПа.

Аналізуючи результати (з табл. 2), встановимо, що при зміні параметру тиску в тракторних шинах відбувається зміщення резонансних частот, які виникають в зонах переднього моста та остова трактора на 5,7% та 8,1%, відповідно. Зменшується величина вертикальних прискорень сидіння в зонах переднього моста на 1,6% та остова трактора на 12,7%. Але в той же час, спостерігається зростання значення вертикального прискорення сидіння в зоні дії напівпричіпного агрегату на 6,3%.

Таблиця 2 – Вертикальні прискорення сидіння в резонансних зонах при різному тиску в тракторних шинах

Дія агрегатів	Тиск в тракторних шинах, кПа		
	$p_{sh1} = 160$ $p_{sh2} = 140$	$p_{sh1} = 140$ $p_{sh2} = 120$	$p_{sh1} = 120$ $p_{sh2} = 100$
Резонансна частота, Гц:			
Переднього моста	1,39	1,37	1,31
Напівпричіпного агрегату	1,56	1,56	1,56
Остову трактора	1,96	1,9	1,8
Вертикальних прискорень сидіння оператора, м/с ² :			
Переднього моста	1,87	1,86	1,84
Напівпричіпного агрегату	2,7	2,78	2,87
Остову трактора	2,67	2,5	2,33

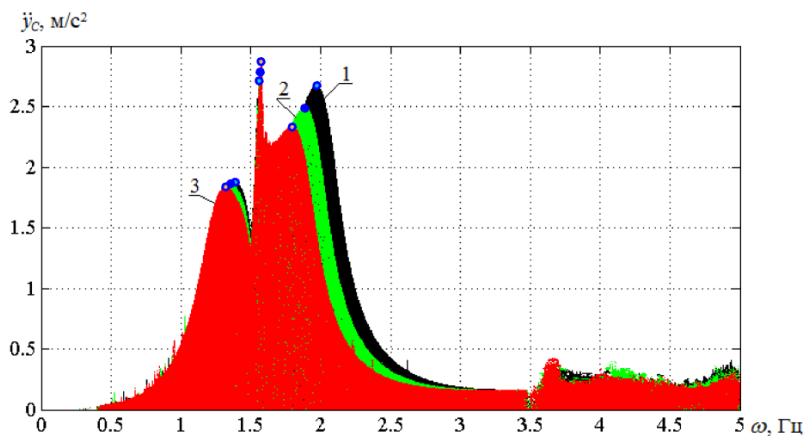


Рис. 6. Залежність вертикальних прискорень сидіння оператора від частоти зовнішнього збурення при варіюванні показником тиску в шинах трактора:

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

Зважаючи на отримані дані, доцільно провести дослідження впливу варіювання тиску в шинах напівпричіпної цистерни (рис. 7). Результати

моделювання зведено до табл. 3. Відомо, що на напівпричіпній цистерні МЖТ-10 встановлено шини розмірами 16,5/70 - 18 КФ - 97.

Таблиця 3 – Вертикальні прискорення сидіння в резонансних зонах при різному тиску в шинах цистерни

Дія агрегатів	Тиск в шинах тракторної цистерни, кПа			
	$p_{sh3} = 400$ $p_{sh4} = 400$	$p_{sh3} = 250$ $p_{sh4} = 250$	$p_{sh3} = 400$ $p_{sh4} = 400$	$p_{sh3} = 250$ $p_{sh4} = 250$
	Резонансна частота, Гц:		Вертикальні прискорення сидіння, м/с ² :	
Переднього моста	1,39	1,36	1,87	1,84
Напівпричіпного агрегату	1,56	1,46	2,7	2,38
Остову трактора	1,96	1,96	2,67	2,66

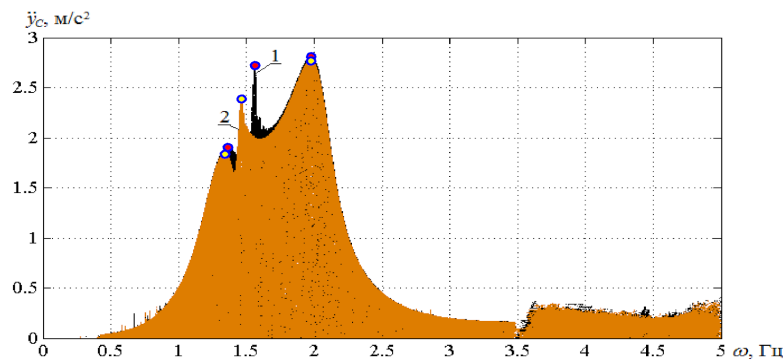


Рис. 7. Залежність вертикальних прискорень сидіння оператора від частоти зовнішнього збурення при варіюванні показником тиску в шинах цистерни:

1 – $p_{sh3} = 400$ кПа і $p_{sh4} = 400$ кПа; 2 – $p_{sh3} = 250$ кПа і $p_{sh4} = 250$ кПа

Аналізуючи результати з табл. 3 відмітимо, що величина вертикальних прискорень сидіння оператора та значення резонансних зон дії переднього моста та остова трактора при варіюванні значенням тиску в шинах цистерни змінюється в межах 2%. При дослідженні дії напівпричіпного агрегату резонансна зона зміщується на 6,4%, а величина вертикальних прискорень зменшується на 11,8%. Таким чином, встановлено, що для зниження показників плавності ходу колісного трактора при виконанні транспортної роботи з агрегатом змінної маси рекомендовано одночасно зменшувати тиск в шинах, як трактора, так і цистерни.

При зниженні тиску в шинах необхідно враховувати зміну техніко-економічних показників трактора. Перспективою подальших досліджень є вирішення питання оптимізації з метою зменшення величини показників плавності ходу колісного трактора при русі з напівпричіпною цистерною з дотриманням техніко-економічних показників (витрати палива, продуктивності, тощо).

Висновки. В роботі наведено методичні викладки, за допомогою яких можливо виконати моделювання динамічної моделі повздовжньо-кутового руху трактора з агрегатом змінної маси та провести дослідження плавності ходу.

Встановлено, що при перевезенні рідкого вантажу вплив на показники плавності ходу колісного трактора більші, ніж при транспортуванні твердого вантажу і різниця може досягати до 8%.

Визначено, що зміщення резонансної зони впливу напівпричіпного агрегату на вертикальні прискорення сидіння оператора при варіюванні висотою заповнення

цистерни від 0,8 до 1,6 м носить характер квадратичної функції, а саме параболи.

Надано практичні рекомендації щодо зменшення показників плавності ходу колісного трактора з агрегатом змінної маси за рахунок зменшення тиску в шинах.

Список літератури

1. Meprozet Kościan S.A. *Hydraulic stirrer*. URL: http://meprozet.pl/Hydrauliczne_mieszadlo_slimakowe_ru.html (дата звернення: 20.10.2019).
2. Ворохобин, А.В. Тракторы и автомобили. Теория и эксплуатационные свойства : учебное пособие / Ворохобин А.В., Гребнев В.П., Поливаев О.И. – Москва : КноРус, 2018. – 259 с
3. Надькто, В.Т. Исследование плавности хода МТА на основе модульных энергетических средств / В.Т. Надькто // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1998. – № 2. – С. 27 – 29.
4. Клубничкин, В.Е. Оценка влияния внешних условий на лесозаготовительные машины / В.Е. Клубничкин // Лесной вестник. – 2010. – № 6. – С. 119 – 123.
5. Кальченко Б.И. Влияние плавности хода колесных тракторов на навантаженість трансмісії / Б.И. Кальченко, О.Ю. Ребров, А.П. Кожушко // Автомобильный транспорт. – 2017. – № 41. – С. 30–37.
6. Ding Z. Design and Analysis of the Suspension for Electric Tractor / Z. Ding, B. Li // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2019. – Т. 493. – №. 1. – С.1 – 6. – doi:10.1088/1757-899X/493/1/012077.
7. Zolotarevskaya, D.I. Changes in the rheological properties and density of a loamy sandy soddy-podzolic soil under the impact of a wheel tractor / D.I. Zolotarevskaya // Eurasian soil science. – 2013. – Т. 46. – №. 7. – P. 758 – 767. doi: 10.1134/S1064229313070120.
8. Cutini M. Whole-body vibration in farming: Background document for creating a simplified procedure to determine agricultural tractor vibration comfort / M. Cutini, M. Brambilla, C. Bisaglia // Agriculture. – 2017. – Т. 7. – №. 84. – 20 p. doi:10.3390/agriculture7100084.
9. Мамонтов, А.Г. Исследование плавности хода трактора с прицепом при движении по дороге с асфальтным покрытием / А.Г. Мамонтов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 19. – С. 90 – 94.

10. Мамонтов, А.Г. Формування математичної моделі динамічної навантаженості ходової системи колісного трактора з напівпричіпним агрегатом / А.Г. Мамонтов, А.П. Кожушко, О.Ю. Ребров // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2019. – № 1. – С. 29 – 41. – doi:10.20998/2413-4295.2019.01.04.
11. Кальченко Б.І. 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.
12. Мецкерский, И.В. Работы по механике тел переменной массы. – Москва: Изд. Технико-теоретической литературы, 1949. – 275 с.
13. Цюлковский, К.Э. Исследование мировых пространств реактивными приборами. – «Научное обозрение», 1903. – № 5. – С. 45 – 75.
14. Калінін Є.І. Формування системних властивостей транспортно-технологічних агрегатів змінної маси автореф. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец. 05.22.20 «Експлуатація та ремонт засобів транспорту» / Є.І. Калінін. – Харків, 2019. – 40 с.
15. Кожушко, А.П. Математичне моделювання низькочастотних коливань в'язкої рідини в горизонтальній смості з вільною поверхнею / А.П. Кожушко, О.Л. Григор'єв // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2018. – № 3 (1279). – С. 41 – 51.
16. 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». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2018. – № 27 (1303). – С. 34 – 61.
17. Сергиенко, А. Н. Методика описания неровностей профиля дороги при моделировании подвески автомобиля с рекуператором энергии колебаний / А. Н. Сергиенко, Н. Г. Медведев, Б. Г. Любарский, С. Н. Беляев, С.В. Шушляпин // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2013. – №37. – С. 185–192.
18. Сазонов, И.С. Моделирование активного поддресоривания сиденья водителя колесного трактора / И.С. Сазонов, Н.Н. Гурский, Н.П. Амелченко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2012. – №4. – С. 77 – 85.
- 2019, vol. 1, issue 493, pp. 1 – 6, doi:10.1088/1757-899X/493/1/012077.
7. Zolotarevskaya D. I. Changes in the rheological properties and density of a loamy sandy soddy-podzolic soil under the impact of a wheel tractor. *Eurasian soil science*, 2013, vol. 7, issue 46, pp. 758 – 767, doi: 10.1134/S1064229313070120.
8. Cutini M., Brambilla M., Bisaglia C. Whole-body vibration in farming: Background document for creating a simplified procedure to determine agricultural tractor vibration comfort. *Agriculture*, 2017, vol. 84, issue 7, 20 p., doi:10.3390/agriculture7100084.
9. Mamontov A.G. Issledovanie pлавnosti hoda traktora s pritsepom pri dvizhenii po doroge s asfaltnym pokrytiem [Study of the smooth running of a tractor with a trailer when driving on an asphalt road]. *Visnyk NTU «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University «KhPI»], 2012, vol. 19, pp. 90 – 94.
10. Mamontov A.G., Kozhushko A. P., Rebrov A. Y. Formuvannia matematychnoi modeli dynamichnoi navantazhenosti khodovoi systemy kolisnogo traktora z napivprychipnym ahrehatom [Formation of mathematical model of dynamic loading of a running system of a wheeled tractor with a semi-trailer unit]. *Visnyk NTU «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University «KhPI»], 2019, vol. 1, pp. 29 – 41, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.04.
11. Kal'chenko B. I., Rebrov A. Y., Kozhushko A. P., Mamontov A. G. Pлавnist' rukhu yak skladova dynamiky traktora : monografiya [Smoothness of motion as a component of tractor dynamics: monograph]. Kharkov, FOP Panov A.M. Publ., 2018. 164 p.
12. Meshchersky I.V. Raboty po mehanike tel peremennoy massy [Work on the mechanics of bodies of variable mass]. Moscow, Technical and theoretical literature Publ., 1949, 275 p.
13. Tsiolkovsky K.E. Issledovanie mirovyykh prostranstv reaktivnyimi priborami [Exploring World Spaces with Jet Devices]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 1903, vol. 5, pp. 45 – 75.
14. Kalinin E.I. Formuvannia systemnykh vlastyvoest transportno-tekhnolohichnykh ahrehativ zminnoi masy [The formation of the system properties of transport and technological units of variable mass]. Doctoral dissertation, Kharkiv, 40 p.
15. Kozhushko A. P., Grygoriev A. L. Matematychno modelyuvannia nyz'kochastotnykh kolyvan' v'yazkoyi ridyny v horizontal'nyi yemnosti z vil'noyu poverkhneyu [Mathematical modeling of ow-frequency oscillations of viscous fluid in horizontal container with free surface]. *Visnyk NTU «KhPI»* [Bulletin of the National Technical University «KhPI»], 2018, vol. 3 (1279), pp. 41–51.
16. Kozhushko A. P., Grigiriev A. L. Modelyuvannia pov'yazanykh kolyvan' kolisnogo traktora ta tsysterny z ridynoyu na pryamomu shlyakhu zi skladnym rel'yefom [Modeling of coupled oscillations of wheeled tractors and tanks with liquid on a straight road with difficult terrain]. *Visnyk NTU «KhPI»* [Bulletin of the NTU "KhPI"], 2018, vol. 27 (1303), pp. 34 – 61.
17. Serhyenko, A. N., Medvedev, N. H., Liubarskiy, B. H., Belyaev, S. N., Shushlyapin, S. V. Metodika opisaniya nerovnostey profilya dorogi primodelirovaniy podveski avtomobilya s rekuperatorom energii kolebanij [Method of road roughness description in the simulation car suspension with heat recovery energy vibrations]. *Visnyk NTU «KhPI»* [Bulletin of the NTU "KhPI"], 2013, vol. 37, 185 – 192.
18. Sazonov I.S., Gursky N.N., Amelchenko N.P. Modelirovanie aktivnogo podressorivaniya sidenya voditelya kolesnogo traktora [Modeling the active suspension of a wheel tractor driver's seat]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 2012, vol. 4, pp. 77 – 85.

References (transliterated)

1. Meprozet Kościan S.A. *Hydraulic stirrer*. URL: http://meprozet.pl/Hydrauliczne_mieszadlo_slimakowe_ru.html (accessed: 20.10.2019).
2. Vorohobin A. V., Grebnev V. P., Polivaev O. I. Traktory i avtomobili. Teoriya i ekspluatatsionnyye svoystva : uchebnoe posobie [Tractors and cars. Theory and operational properties: a learning object]. Moscow. KnoRus, 2018, 259 p.
3. Nadykto V. T. Issledovanie pлавnosti hoda MTA na osnove modulnykh energeticheskikh sredstv [A study of the smooth running of MTA based on modular energy tools]. *Traktory i selskohozyaystvennyye mashiny* [Tractors and agricultural machinery], 1998, vol. 2, pp. 27 – 29.
4. Kubnichkin V. Eu. Otsenka vliyaniya vneshnih usloviy na lesozagotovitelnyye mashiny [Assessment of the influence of external conditions on forest machines]. *Lesnoy vestnik* [Forestry bulletin], 2010, vol. 6, pp. 119 – 123.
5. Kal'chenko B. I., Rebrov A. Y., Kozhushko A. P. Vplyv pлавnosti khodu kolisnykh traktoriv na navantazhenist transmisii [Influence of smooth running of wheeled tractors on the transmission load]. *Avtomobilnyi transport* [Automobile transport], 2017, vol. 41, pp. 30 – 37.
6. Ding Z., Li B. Design and Analysis of the Suspension for Electric Tractor. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*,

Надійшла (received) 25.08.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кожушко Андрій Павлович (Кожушко Андрей Павлович, Kozhushko Andriy Pavlovych) – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- та тракторобудування, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1312-9992>; e-mail: Andreykozhushko7@gmail.com.