

Кожушко А.П.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ЕНЕРГЕТИЧНІСТЬ СИСТЕМИ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТУ З ПЕРЕМІННОЮ МАСОЮ ЗА СТАЛОГО РУХУ

У статті виконано дослідження енергетичного складника машинно-тракторного агрегату з перемінною масою за умови сталого руху. Сформовані рівняння, які описують запас механічної енергії у коливальній системі колісного трактора та причіпної або напівпричіпної цистерн за вертикального, горизонтального та кутового переміщення. Визначено вплив енергетичного складника залежно від висоти рівня рідини в цистернах. Отримано закономірності впливу величини довжини мікронерівності на енергетичний складник. Запропоновано метод оцінки енергетичного складника руху за рахунок введення енергетичного коефіцієнта передачі.

Ключові слова: колісний трактор, цистерна, колювання рідини, нелінійна модель, енергетичний складник.

Постановка проблеми. Транспорт є однією з основних галузей будь-якої держави. Складовою частиною транспортних операцій є перевезення. Основна тенденція розвитку транспорту полягає в підвищенні енергонасиченості транспортної машини (вантажного автомобіля, колісного трактора тощо) та, відповідно, збільшення вантажу (твердого або рідкого), що перевозиться.

Не секрет, що в деяких агропромислових підприємствах доля транспортної роботи складає більше 50% на рік, тому дослідження та підвищення якості перевезень у цій галузі є пріоритетним.

Особливу увагу слід приділити перевезенню рідкого вантажу в цистернах, які транспортуються в фермерських угіддях колісними тракторами. На відміну від автомобільних цистерн, тракторні позбавлені перегородок, тому під час транспортування відбувається перерозподіл мас в агрегаті, що впливає на показники динамічності, енергетичності, безпеки руху тощо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розкриття проблематики дослідження енергонасиченості колісних тракторів відображено в роботах [1–4], які показують тенденцію розвитку тракторобудування як в світі загалом, так і в Україні зокрема. Відомі також роботи [5–9], в яких за рахунок динаміки руху транспортного засобу досліджують енергетичність за умови усталеного руху. Зокрема, в роботі [6] наведено методологічні викладки для оцінки додаткових енергетичних витрат для транспортно-тягової машини на основі дослідження амплітуди колювань величини тягової сили машини та сил опору. Матеріали роботи [7–8] спрямовані на дослідження впливу динаміки сільськогосподарських машин на енер-

гетичні витрати з використанням методу контролю характеристик агрегатів [7] з використанням коливальної системи машинно-тракторного агрегату [8]. Підводячи підсумок аналізу публікацій, слід зазначити, що всі вищеперераховані роботи вирішують задачу енергетичності або в статичній постановці, або в квазістатичній (мається на увазі врахування не кутових прискорень, а лише лінійних). З огляду на це питання дослідження енергетичності системи колісного трактора з агрегатом перемінної маси в процесі виконання транспортної роботи є доволі актуальним.

Щодо аналізу робіт, присвячених перемінній масі (зокрема, руху рідини в цистерні), то варто згадати роботи І.В. Мещерського [10] та К.Е. Циолковського [11]. Однак у роботі [12] автори за допомогою математичного моделювання континуальної моделі низькочастотних колювань оболонки, використовуючи характеристики поверхневих хвиль Релея (частинних похідних), досягли перерозподілу мас в цистерні, а в роботі [13] континуальну модель замінили на дискретну модель, яка з достатньою для практики точністю може використовуватися в динамічній (нелінійній) моделі руху колісного трактора з агрегатом перемінної маси.

Постановка завдання. Основне посилання, яке мають матеріали статті, – це дослідження енергетичності системи за умови впливу перемінної маси агрегату (колювання рідини в цистерні) на сталий рух колісного трактора, а також запропонування методу оцінки енергетичного складника руху (у вертикальній, горизонтальній та кутовій площинах) в динамічній моделі під час виконання транспортної роботи.

Виклад основного матеріалу дослідження. Матеріали статті є продовженням роботи [13], в якій наведено математичний апарат для тестування динамічних якостей транспортного засобу з причіп- (ПЦ) та напівпричіп-цистернами (НПЦ). На рис. 1 наведено спрощені схеми колісного трактора (типу ХТЗ-242К) з ПЦ та НПЦ, на основі яких обґрунтовувалась математична модель.

Динамічна модель руху колісного трактора з ПЦ та НПЦ вирішується на основі вирішення диференціальних рівнянь:

– вертикальних переміщень

$$\frac{d^2 y_{TP}}{dt^2} = f(y_{11}, y_{21}, y_K, y_S, \varphi_{TP}, \varphi_K, x_{TP}); \quad (1)$$

– поздовжні переміщення

$$\frac{d^2 x_{TP}}{dt^2} = f(M_{KP}, i_{TP}, y_{TPi}, P_{BE}); \quad (2)$$

– кутові переміщення

$$\frac{d^2 \varphi_{TP}}{dt^2} = f(x_{TP}, R_x, R_y), \quad (3)$$

де y_{11}, y_{21}, y_K, y_S – вертикальне переміщення мостів трактора, кабіни та сидіння водія; φ_{TP}, φ_K – кут нахилу остову трактора та кабіни; x_{TP} – поздовжнє переміщення трактора; M_{KP} – крутний момент двигуна внутрішнього згоряння; i_{TP} – передавальне число трансмісії трактора; y_{TPi} – функція, яка описує зміну мікропрофілю та макропрофілю дороги; P_{BE} – нелінійна характеристика сили, що створюється коливанням рідини в цистерні; R_x, R_y – поздовжня та вертикальний складник сили, яка прикладена до дишла з боку гаку трактора.

Розрахунок кінетичної енергії зводиться до вирішення елементарного рівняння

$$T = \frac{1}{2}(m \cdot V^2). \quad (4)$$

Зазначимо, що в результаті коливального процесу системи потенційна енергія перетворюється на кінетичну і навпаки. Це обумовлено законами збереження енергії (нелінійна модель замкнена). Таким чином, задля дослідження загального запасу механічної енергії коливального процесу достатньо знайти максимальне значення кінетичної енергії (при цьому значення потенційної буде дорівнювати мінімальному значенню).

Кінетична енергія для вертикальних, горизонтальних та кутових переміщень машинно-тракторного агрегату з ПЦ і НПЦ описуються наступними рівняннями

$$T_{UTP} = \frac{1}{2}(m_T \cdot \dot{y}_T^2 + m_K \cdot \dot{y}_K^2 + m_S \cdot \dot{y}_S^2 + m_1 \cdot (\dot{y}_1^u)^2 + m_2 \cdot (\dot{y}_2^u)^2); \quad (5)$$

$$T_{UПP} = \frac{1}{2}((m_{П} + m_p) \cdot \dot{y}_{П}^2 + m_3 \cdot (\dot{y}_3^u)^2 + m_4 \cdot (\dot{y}_4^u)^2 + m_k^p \cdot (\Delta \dot{y}_K)^2); \quad (6)$$

$$T_{ХТР} = \frac{1}{2} \left(\left(m_T + \sum_{i=1}^2 m_i + m_{DV} \right) \cdot \dot{x}_T^2 + (m_K + m_S) \cdot \dot{x}_K^2 \right); \quad (7)$$

$$T_{ХПР} = \frac{1}{2} \left(\left(m_{П} + \sum_{i=3}^4 m_i + m_p \right) \cdot \dot{x}_{П}^2 + m_k^p \cdot (\Delta \dot{x}_K^p)^2 \right); \quad (8)$$

$$T_{\varphi TP} = \frac{1}{2}(J_T \cdot \dot{\varphi}_T^2 + J_K \cdot \dot{\varphi}_K^2); \quad (9)$$

$$T_{\varphi ПP} = \frac{1}{2}((J_{П} + J_v) \cdot \dot{\varphi}_{П}^2), \quad (10)$$

де m_T – маса остову трактора (разом з двигуном, причепом для агрегату та половиною дишла); m_K – маса кабіни; m_S – маса сидіння (разом із трактористом); $m_{П}$ – маса рами та оболонки цистерни (разом з дишлом або його половиною (для ПЦ)); m_p – маса глибинної частини рідини, що рухається разом із оболонкою; m_k^p – маси поверхневих шарів рідини, де відбуваються низькочастотні коливання; m_{DV} – це складник інерційної маси трактора, яка визначається параметрами двигуна та трансмісії; $m_1, \dots, m_4$ – маси мостів (разом із колесами); J_T, J_K – момент інерції трактора та кабіни; $J_{П}$ – момент інерції цистерни; J_v – момент інерції руху рідини в цистерні. Оскільки великий вплив на вертикальний запас механічної енергії транспортного засобу мають кутові переміщення (та, відповідно, кутовий запас енергії), то можна поєднати T_{UTP} та $T_{\varphi TP}$, а також $T_{UПP}$ та $T_{\varphi ПP}$.

На рис. 2 наведено залежності зміни загального запасу механічної енергії від рівня рідини в цистерні.

Аналіз отриманих залежностей (рис. 2) дозволив встановити, що на запас механічної енергії колісного трактора за руху в вертикальній, горизонтальній та кутовій площинах рівень рідини в ПЦ не впливає, адже діапазон значень:

- $T_{ХТР}(H)$ розкидано в межах 0,8% (рис. 2а);
- $T_{\varphi УТР}(H)$ розкидано в межах 2,6% (рис. 2б).

Що стосується причіпної цистерни МЖТ-16, то з даних на рис. 2 визначено, що з нарощуванням рівня рідини в цистерні запас механічної енергії збільшується в широкому діапазоні:

- $T_{ХТР}(H)$ змінюється в межах 97 ... 556 кДж (рис. 2а);
- $T_{\varphi УТР}(H)$ змінюється в межах 124 ... 388 Дж (рис. 2б).

Для трактора з напівпричіпною цистерною ВНЦ-20 запас механічної енергії збільшується в діапазоні:

- $T_{ХТР}(H)$ змінюється в межах 151 ... 237 кДж (рис. 2в);
- $T_{ХТР}(H)$ змінюється в межах 625 ... 1143 кДж (рис. 2в);
- $T_{\varphi УТР}(H)$ змінюється в межах 49 ... 78 Дж (рис. 2в);

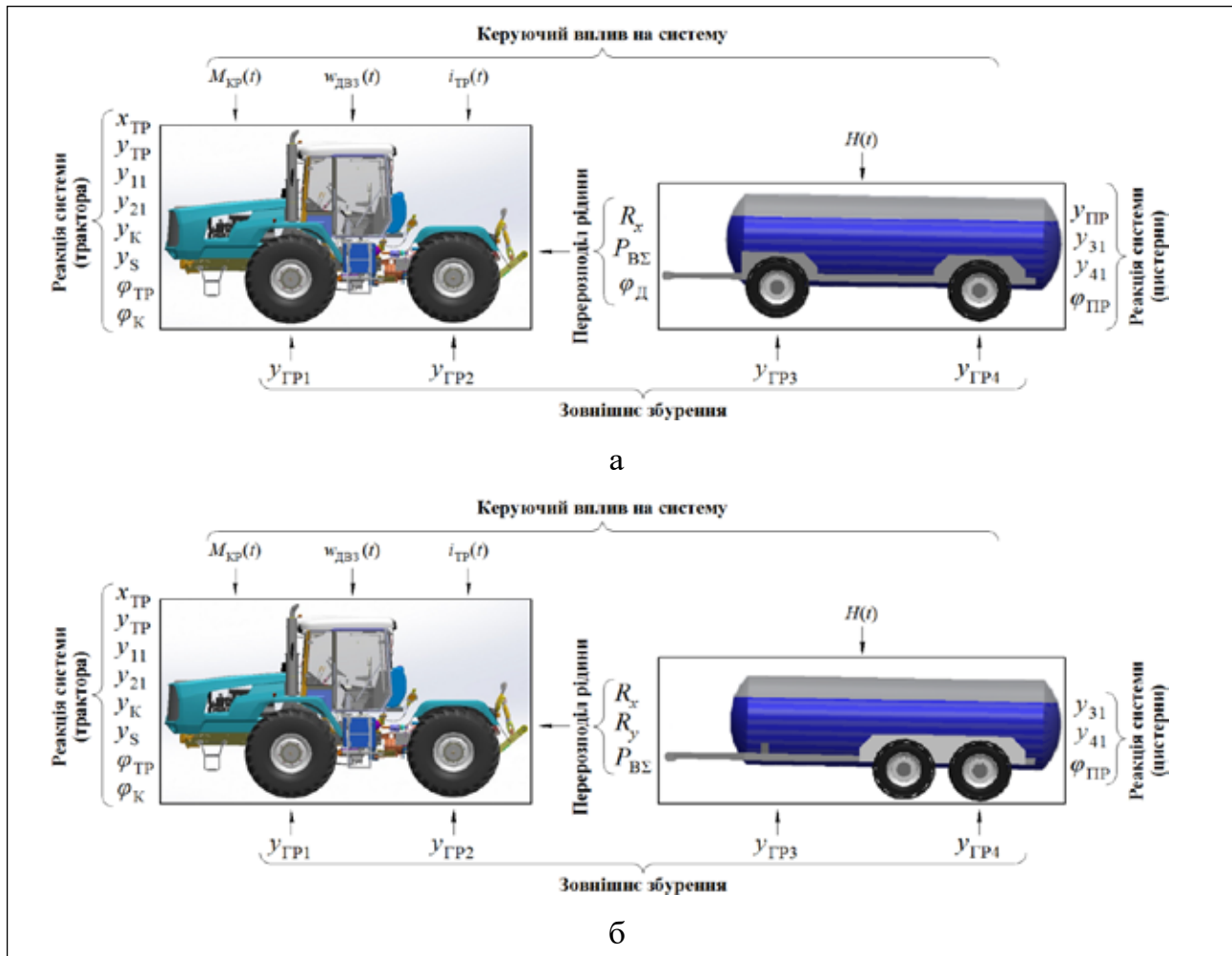


Рис. 1. Динамічна модель колісного трактора з агрегатами перемінної маси: а – ПЦ; б – НПЦ

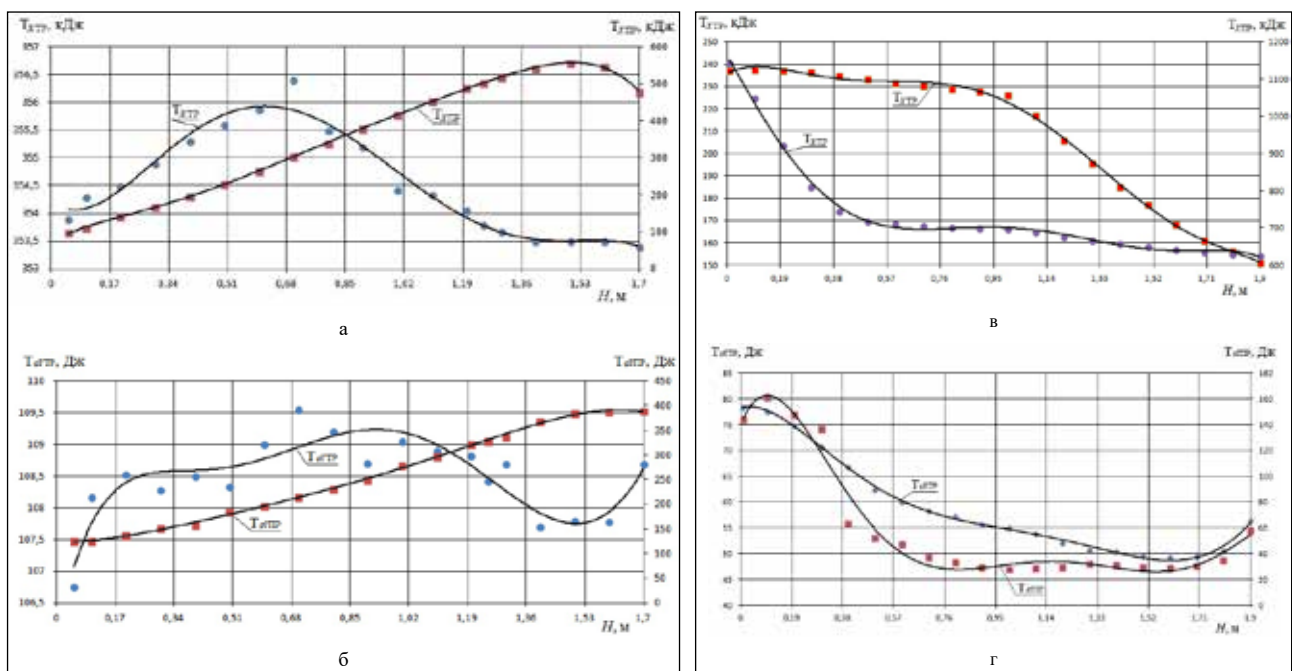


Рис. 2. Залежності зміни загального запасу механічної енергії від рівня рідини в цистерні: а, б – причіп-цистерна МЖТ-16; в, г – напівпричіп-цистерна ВПЦ-20; а, в – горизонтальні; б, г – вертикальні та кутові

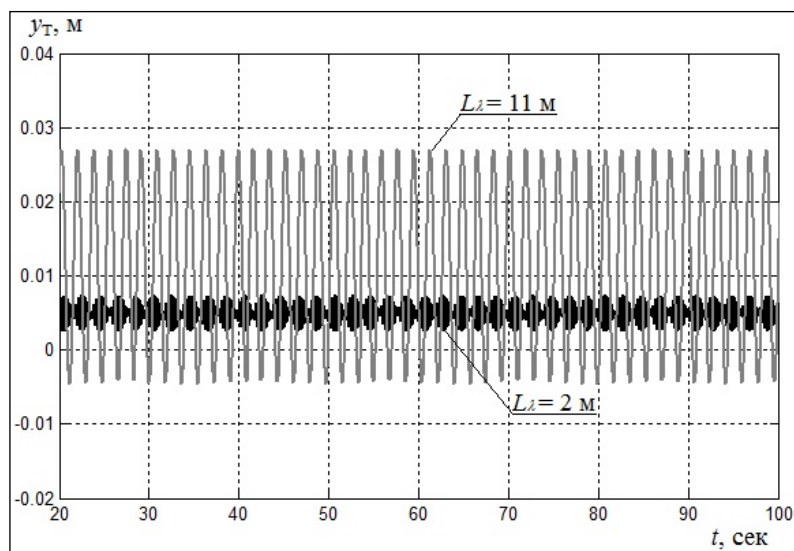


Рис. 3. Зміна вертикальних переміщень остова трактора за сталого руху в умовах різної довжини мікронерівностей

– $T_{\phi УПР}(H)$ змінюється в межах 28 ... 161 Дж (рис. 2 г).

Оскільки на запас механічної енергії колісного трактора (в вертикальних та горизонтальних площинах, а також кутових переміщеннях) рівень рідини в цистерні не впливає, то доцільно навести результати моделювання випадків впливу.

явище пояснюється зменшенням (для $T_{\phi УПР}(H)$ та $T_{\phi УПР}(H)$) швидкості деформації елементів коливальної системи.

Для НПЦ збільшення величини довжини мікронерівностей має суттєвий характер, про що свідчить збільшення запасу механічної енергії в усіх трьох площинах руху. Але водночас спостері-

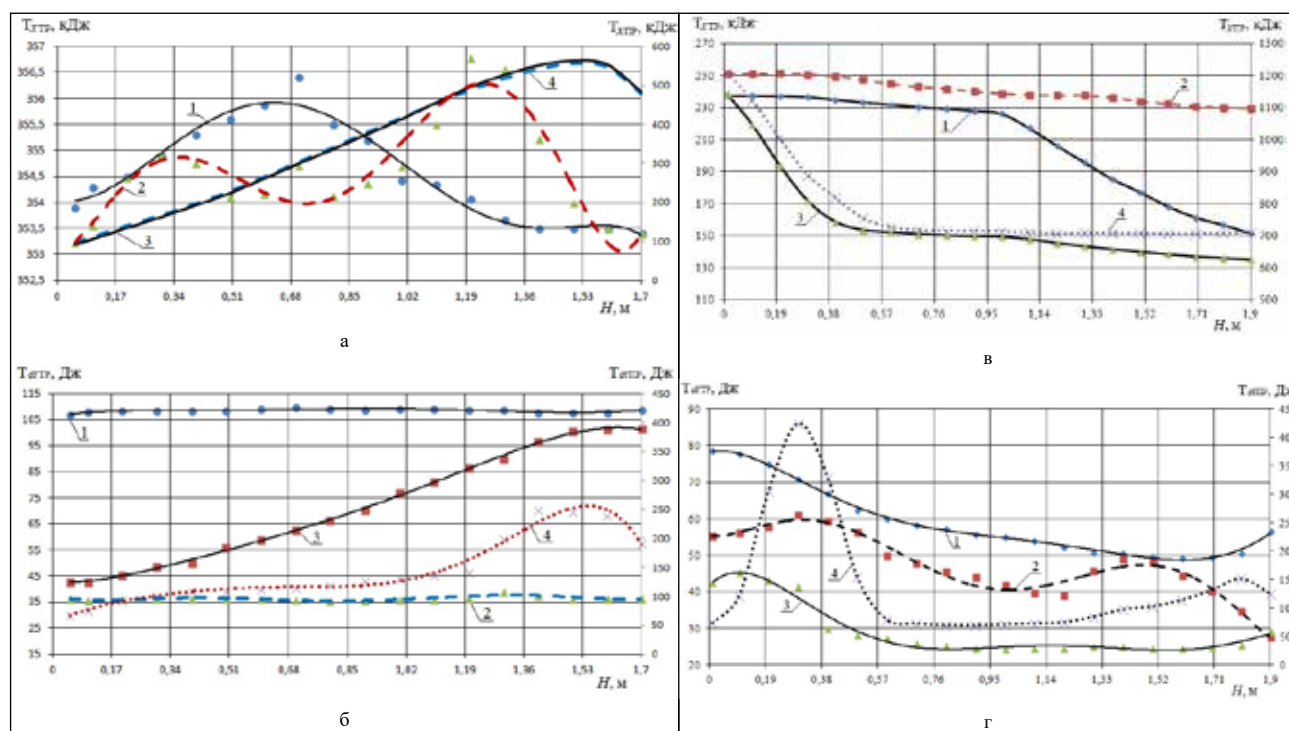


Рис. 4. Залежності зміни загального запасу механічної енергії від рівня рідини в цистерні під час транспортування з різною довжиною мікронерівностей: а, б – для причіп-цистерни МЖТ-16; в, г – для напівпричіп-цистерни ВНЦ-20; а – горизонтальна площина; б – вертикальна та кутова площини; 1 – трактора за $L_{\lambda} = 2$ м; 2 – трактора за $L_{\lambda} = 11$ м; 3 – цистерни за $L_{\lambda} = 2$ м; 4 – цистерни за $L_{\lambda} = 11$ м

гається зменшення величини енергії у вертикальній площині колісного трактора (що може пояснюватися наявністю складника R_y)

На основі вищенаведених залежностей (рис. 2, 4) доцільно оцінити вплив енергетичних складників ПЦ і НПЦ на трактор. Для цього необхідно дослідити «ідеальну» модель сталого руху, тобто не враховувати сумарну силу, яка діє на трактор з боку ґрунту у горизонтальному напрямку. Окрім того, необхідно ввести таке поняття, як енергетичний коефіцієнт передачі, який обчислюється за наступними рівняннями

$$k_{Tx} = \frac{T_{ХПР}(H)}{T_{ХТР}(H)};$$

$$k_{Ty} = \frac{T_{УПР}(H)}{T_{УТР}(H)};$$

$$k_{T\phi} = \frac{T_{\phi ПР}(H)}{T_{\phi ТР}(H)}.$$

На рис. 5 наведено залежність енергетичного коефіцієнту передачі від рівня рідини в ПЦ та НПЦ.

Аналізуючи результати, які наведені на рис. 5а, можна помітити, що для причіп-цистерни:

- у вертикальній площині (k_{Tx}) відбувається перерозподіл енергетичної передачі (за рахунок усадки центра ваги цистерни);

- у горизонтальній площині (k_{Ty}) спостерігається зворотна величина енергетичного коефіцієнта передачі, тобто вплив у даній площині коливань цистерни на трактор відсутній.

Для напівпричіп-цистерни (рис. 5б), також як і для причіп-цистерни, в горизонтальній площині (k_{Ty}) відбувається перерозподіл енергетичної передачі (за рахунок збільшення маси цистерни відносно маси трактора, а також в момент інерції рідини, що коливається, знаходиться в максимумі [13]).

В інших випадках енергетичний коефіцієнт передачі залишається не змінним, що вказує нам на вплив коливань рідини в цистерні на трактор.

Висновки. У статті наведено принцип фор-

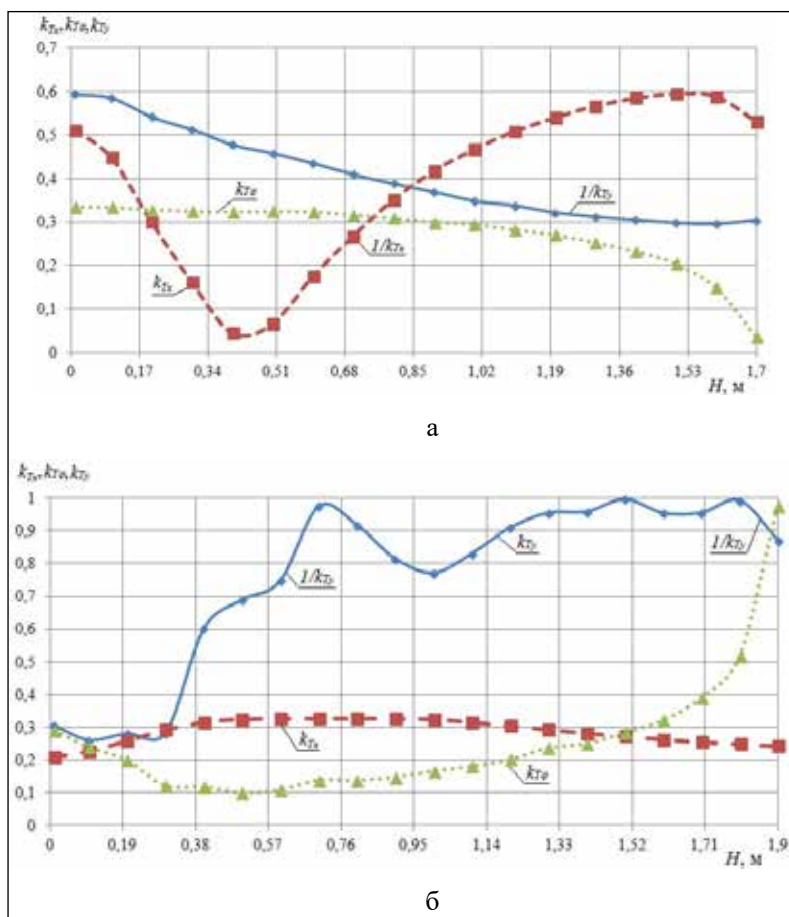


Рис. 5. Залежність енергетичного коефіцієнту передачі від рівня рідини у цистернах: а – причіп-цистерна МЖТ-16; б – напівпричіп-цистерна ВНЦ-20

мування динамічної (нелінійної) моделі прямо-лінійного руху машинно-тракторного агрегату з перемінною масою за сталого руху транспортної роботи. Встановлено запас механічної енергії в горизонтальній, вертикальній та кутовій площинах руху коливальної системи. Встановлено взаємозв'язок між зміною величини довжини мікронерівності та енергетичного складника колісного трактора та ПЦ, або НПЦ.

Встановлено, що перерозподіл мас в ПЦ не впливає на вертикальні та частково на горизонтальні переміщення (тільки до моменту усадки центру ваги цистерни). Для НПЦ перерозподіл мас не впливає тільки на вертикальні переміщення (тільки до моменту збільшення маси цистерни відносно маси трактора, а також в момент інерції рідини, що коливається, знаходиться в максимумі).

Список літератури:

1. Лебедев А.Т. Некоторые проблемы теории трактора тяговоэнергетической концепции. *Механізація сільськогосподарського виробництва: Вісник ХНТУСГ*. 2012. С. 5–13.

2. Самсонов В.А., Лачуга Ю.Ф. Расчет оптимальных значений мощности и энергонасыщенности сельскохозяйственного трактора. *Тракторы и сельхозмашины*. 2017. № 7. С. 25–31.
3. Надикто В.Т. Роль энергонасыщенности тракторов в формировании их типажа. *Тракторы и сельхозмашины*. 2012. № 3. С. 16–21.
4. Кожушко А.П. Аналіз конструктивних особливостей причіпних та напівпричіпних цистерн у складі машинно-тракторного агрегату. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2019. № 5 (1330). С. 34–40. doi:10.20998/2413-4295.2019.05.05.
5. Кожушко А.П. Коливання механічних систем в автомобіле- та тракторобудуванні : навчальний посібник. Харків : ФОП Панов А.М. 2018. 316 с.
6. Подригало М.А., Артемов Н.П., Абрамов Д.В., Шуляк М.Л. Оценка дополнительных энергетических потерь при установившемся режиме движения транспортно-тяговых машин. *Механика та машинобудування «ХПІ»*. 2015. № 9 (1118). С. 98–107.
7. Артьомов М.П. Визначення тягових і енергетичних показників мобільних сільськогосподарських агрегатів при динамічних випробуваннях. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2018. № 13. С. 115–120.
8. Bulgakov V., Adamchuk V., Arak M., Nadykto V., Kyurchev V., Olt J. Theory of vertical oscillations and dynamic stability of combined tractor-implement unit. *Agronomy Research*. 2016. № 14(3). 689–710.
9. Шуляк М.Л., Лебедев А.Т., Артьомов М.П., Калінін Є.І. Оцінка функціонування сільськогосподарського агрегату за динамічними критеріями. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2016. № 4. С. 218–226.
10. Мещерский И.В. Работы по механике тел переменной массы. Москва : Техничко-теоретической литературы. 1949. 275 с.
11. Циолковский К.Э. Исследование мировых пространств реактивными приборами. *Научное обозрение*. 1903. № 5. С. 45–75.
12. Кожушко А.П., Григор'єв О.Л. Математичне моделювання низькочастотних коливань в'язкої рідини в горизонтальній ємності з вільною поверхнею. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2018. № 3 (1279). С. 41–51.
13. 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.
14. Кальченко Б.І., Кожушко А.П., Кісельов А.Р. Оцінка плавності руху самохідної машини при впливі нерівностей поверхні. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2017. № 30 (1252). С. 56–63.

ЕНЕРГЕТИЧНОСТЬ СИСТЕМЫ МАШИННО-ТРАКТОРНОГО АГРЕГАТА С ПЕРЕМЕННОЙ МАССОЙ ПРИ ПОСТОЯННОМ ДВИЖЕНИИ

В статье выполнено исследование энергетической составляющей машинно-тракторного агрегата с переменной массой при постоянном движении. Сформированы уравнения, описывающие запас механической энергии в колебательной системе колесного трактора и прицепной или полуприцепной цистерны при вертикальном, горизонтальном и угловом перемещении. Определено влияние энергетической составляющей в зависимости от высоты уровня жидкости в цистернах. Получены закономерности влияния величины длины микронеровности на энергетическую составляющую. Предложен метод оценки энергетической составляющей движения за счет введения энергетического коэффициента передачи.

Ключевые слова: трактор колесный, цистерна, колебания жидкости, нелинейная модель, энергетическая составляющая.

ENERGETIC SYSTEM OF MACHINE AND TRACTOR UNITS WITH VARIABLE WEIGHT AT A CONSTANT MOVEMENT

In the article is carried out the research of the energy component of the machine-tractor unit with variable weight at a constant motion. Generated equations describing the supply of mechanical energy in the vibration system of a wheeled tractor and trailer or semi-trailer cisterns at vertical, horizontal and angular displacement. The influence of the energy component depending on the height of the liquid level in the cisterns is determined. The regularities are obtained of the influence of the magnitude of the length of microworld energy on the energy component. The method is proposed of estimating the energy component of motion due to the introduction of the energy transfer coefficient.

Key words: wheeled tractor, cistern, fluid fluctuations, nonlinear model, energy component.