

Сахно В.П.¹, Мурований І.С.², Поляков, В.М.¹, Попелиш Д.М.¹.
¹Національний транспортний університет
²Луцький національний технічний університет

ДО ВИЗНАЧЕННЯ ГАЛЬМІВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АВТОПОЇЗДА З ЧАСТКОВО ЗАПОВНЕНОЮ ЦИСТЕРНОЮ

Збільшення обсягів перевезень і розширення номенклатури перевезених вантажів, що перевозяться вимагають удосконалення структури і продуктивності автотранспортних засобів (АТЗ). Суттєвим резервом підвищення ефективності використання АТЗ є збільшення кількості вантажів, що перевозяться автопоїздами без значного збільшення їх кількості на автомобільних дорогах. Вирішити цю проблему можна за допомогою великотоннажних автопоїздів, у тому числі багатоланкових. У зв'язку з цим одним із найважливіших завдань є необхідність забезпечення таких автопоїздів необхідним рівнем гальмівних властивостей.

У роботі показано, що при частково заповненій цистерні змінюються динамічні якості колісних транспортних засобів внаслідок великих переміщень центру мас вантажу в резервуарі, що призводить до додаткових навантажень, що діють на конструкцію цистерни, а також суттєвого зниження стійкості, керованості і гальмівних властивостей транспортних засобів, що визначаються нормальними реакціями опорної поверхні на його колеса (осі). У роботі визначені нормальні реакції опорної поверхні для різного ступеня заповнення цистерни і для автопоїзда з жорстким вантажем. Розділення внутрішнього об'єму цистерни на окремі секції майже не впливає на максимальне значення сили інерції у разі гальмування автопоїзда із сталим уповільненням, але при цьому частота коливань цієї сили є більшою. При цьому рух рідини відносно цистерни призводить до зменшення гальмівного шляху. Поділ цистерни на секції, як і ступінь її заповнення також впливають на довжину шляху – найкоротший у автопоїзда з односекційною цистерною із 50% наповненням.

Ключові слова: автопоїзд, цистерна, ступінь заповнення, секційність цистерни, нормальна реакція, уповільнення, гальмівний шлях.

ВСТУП

Особливістю транспортних засобів для перевезення рідин є можливість переміщення транспортованого вантажу щодо резервуару цистерни. Іншою їх особливістю є високе розташування центру маси над дорогою [1]. Коливання рідкого вантажу всередині резервуару призводять до істотної зміни експлуатаційних властивостей автопоїзда, зокрема поздовжньої та поперечної стійкості та керованості, а також його гальмівних властивостей. Вплив переміщення рідини на динаміку транспортного засобу істотно зростає зі збільшенням маси транспортного засобу та його розмірів. Унаслідок аварій, що відбуваються при експлуатації рухомого складу, що перевозить рідкі вантажі, завдається значної шкоди навколишньому середовищу і здоров'ю людей. Тому проблема забезпечення безпеки руху транспортних засобів, що перевозять рідини, потребує свого вирішення. У зв'язку з цим розробляються заходи щодо зниження впливу коливань рідини всередині резервуарів на динаміку транспортного засобу. Перший спосіб передбачає установку внутрішніх перегородок. Другий полягає у зміні форми резервуару цистерни. Третій варіант заснований на введенні в підвіску базового шасі або в кріплення цистерн до рами автомобіля спеціальних елементів з метою зміни жорсткості [1]. Усі наведені заходи можуть бути розглянуті на зміні форми резервуару. Залежно від методу виконання цистерна може мати постійний або змінний переріз. Найпоширеніші форми поперечних розрізів автоцистерн: коло, еліпс або прямокутник із закругленими кутами. При цьому форма поперечного розрізу автоцистерни впливає на наступні характеристики: корисний обсяг, габаритні розміри, стійкість автоцистерни загалом.

При транспортуванні частково заповненої цистерни змінюються динамічні якості колісних транспортних засобів (КТЗ) так, що вони суттєво відрізняються від динамічних характеристик інших КТЗ. Внаслідок великих переміщень центру мас вантажу в резервуарі з'являються додаткові навантаження, що діють на конструкцію цистерни, а також істотно знижують стійкість і керованість КТЗ, а також і гальмівні властивості.

Одним із шляхів поліпшення стійкості автопоїзда з цистерною в режимі гальмування може бути прогнозування моменту дії та характеру динамічних процесів рідкого вантажу на КТЗ та виконання попереджувальних дій виконавчими механізмами.

АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Rakheja і Wang [2] аналізували процес гальмування частково заповнених автоцистерн, що мають декілька секцій, а також вплив розташування перегородок на гальмівні характеристики

транспортного засобу. Була розроблена кінетостатична модель частково заповнених цистерн круглого та еліптичного перетинів у поздовжній площині та інтегрована в гальмівну модель автоцистерни для вивчення впливу поздовжнього перетікання рідини на гальмівні властивості. Були отримані дані щодо перерозподілу навантаження, довжини гальмівного шляху, часу гальмування і проміжку часу спрацьовування гальмових механізмів передніх та задніх коліс, а також були проведені параметричні дослідження щодо отримання оптимальних розмірів секцій. Додатково були розроблені моделі автоцистерн шляхом інтегрування статичної моделі рідини і механічної моделі частково заповненої цистерни круглого перерізу, відповідно, до моделі п'ятиосного автопоїзда з напівприцепом в поздовжній площині для прогнозування поведінки транспортного засобу під час прямолінійного сталого гальмування з точки зору коефіцієнта нормального динамічного навантаження [3, 4].

Ibrahim із співавторами [5] досліджували поведінку руху вантажних автомобілів, із двома сферичними ємностями з рідиною. Була складена математична модель кутового коливального та поздовжнього рухів вантажівки категорії N2, яка враховувала фізичні та динамічні характеристики рідинних вантажів. Для імітації руху рідини в резервуарах використовувалась аналогова модель нелінійного маятника із спеціальними коефіцієнтами загасання. Ступінь заповнення резервуара та в'язкість рідини були визначені, як головні чинники поведінки руху транспортного засобу.

Богомаз Г.І. із колегами [6] для моделювання руху рідких вантажів запропонували тривимірний механічний маятниковий аналог, що був заснований на теорії потенційних потоків. Модель мала 3 ступені свободи - рух у поздовжній та поперечній площинах, а також навколо вертикальної осі. Було визначено гідродинамічні параметри механічної системи за допомогою розв'язання тривимірної задачі з граничними умовами рідкого вантажу в резервуарі. Адекватність математичних моделей була перевірена шляхом порівняння аналітичних результатів з даними випробувань. Було визначено, що гідродинамічні параметри суттєво залежать від рівня заповнення. В ході дослідження також було проаналізовано динаміку залізничної цистерни у поздовжній площині за допомогою аналогової маяткової моделі з одним ступенем свободи.

У дослідженнях, [7,8] використовуючи уявлення про хвильовий рух рідини в цистерні, виведено наближені вирази для гальмівного шляху автоцистерни і горизонтального зміщення центру мас рідини, експериментально визначив реальну картину процесів поведінки рідини під час обертання ємності навколо вертикальної осі, розробив методику комплексних експериментальних випробувань для визначення показників гальмівної динаміки, стійкості проти заносу дослідних зразків автоцистерн під час гальмування.

Заслужують на увагу результати робіт [9,10], в яких розглянуті принципи побудови математичних моделей автоцистерн, що реалізують зменшення затрат часу на розрахунки та спрощення інтерпретації отриманих результатів. Аналіз коливання рідини в резервуарі цистерн був виконаний на основі використання моделі еквівалентного твердого тіла, з'єданого з резервуаром за допомогою пружного в'язкого елемента. При цьому урахування мас коліс та деформація ресор фактично не підвищує точність розрахунку кінематичних і динамічних параметрів цистерни під час гальмування.

У роботі [11] запропонований енергетичний спосіб оцінювання динамічної стійкості автомобілів з частково заповненими цистернами за допомогою енергетичного коефіцієнту динамічної стійкості положень. Було визначено, що мінімальне значення енергетичного коефіцієнта динамічної стійкості відповідає заповненню цистерн на 50%.

Kang [12] із співавторами розробив тривимірну квазістатичну модель перетікання рідини, що розглядає одночасне застосування поздовжніх та бічних прискорень, яка була інтегрована в тривимірну модель автомобіля. Модель була застосована для вивчення впливу зміни навантаження рідких вантажів у поздовжній та поперечній площинах на динамічну поведінку транспортних засобів під час гальмування у повороті. Дослідження підтвердило наявність несприятливого впливу моментів відносно поздовжньої, вертикальної та горизонтальної осей, що виникають внаслідок зміни навантаження від перетікання рідини, на динамічні властивості автоцистерн.

Огляд літератури проведених робіт показує, що досліді стосовно динамічного впливу перетікання рідини на рухомі резервуари, зокрема автоцистерни, проведені у великій кількості і мають широке розмаїття щодо напрямлень, складності розрахунків, а також використання методів і теорій. При цьому можна зробити висновок, що поки не існує моделі, за допомогою якої можна автоматично ідентифікувати режим руху з частково заповненим резервуаром за рахунок порівняння характеру зміни навантажень на осі автоцистерни під час гальмування з еталонними змінами

навантажень еквівалентного транспортного засобу з жорстким вантажем. Така модель могла би бути використана в програмному забезпеченні систем управління транспортних засобів.

Також слід зазначити, що під час гальмування автоцистерни певна частина рідкого вантажу деякий час переміщується відносно тіла цистерни по інерції за напрямком руху. В результаті такого переміщення відбувається перерозподіл навантажень на осі тягача і напівпричепа, що певним чином впливає на максимальні величини гальмівних сил, які можуть бути реалізовані кожним з коліс. Таке переміщення рідини всередині частково заповненої автоцистерни може бути використано для збільшення реакцій опорної поверхні на колеса автопоїзда та, відповідно, збільшення сил зчеплення, за допомогою хвильорізів та перегородок певної конструкції, що є актуальним з точки зору забезпечення безпечності експлуатації транспортних засобів з частково заповненими цистернами.

ЦІЛЬ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою роботи є визначення показників гальмівних властивостей автопоїзда з частково заповненою односекційною і трисекційною цистерною при екстремому гальмуванні.

Для досягнення мети роботи сформульовані **наступні задачі**:

- визначення сил інерції рідкого вантажу при частково заповненій односекційній і трисекційній цистерні, а також цистерні з жорстким вантажем;
- визначення нормальних реакцій опорної поверхні на осі автопоїзда при частково заповненій односекційній і трисекційній цистерні, а також цистерні з жорстким вантажем;
- визначення гальмівного шляху автопоїзда з частково заповненою односекційною і трисекційною цистерною, а також цистерною з жорстким вантажем.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ.

У роботі [15] отримані рівняння, що визначають нормальні реакції опорної поверхні на осі автопоїзда з частково заповненою цистерною. Ці рівняння записані у вигляді:

$$Z_1(t, J) = \frac{G(gb + Jh_g)}{gL} + \frac{(b-c)(G_1b_1 + G_{21}b_2 + G_{22}(b_2 + J\frac{m}{k}(1 - \cos(\sqrt{\frac{k}{m}}t))) + \frac{G_1}{g}Jh_{g1} + \frac{G_{21}}{g}Jh_{21} + Jmh_{22}(1 - \cos(\sqrt{\frac{k}{m}}t)))h_{22}}{L L_2}$$

$$Z_2(t, J) = \frac{G(ga - Jh_g)}{gL} + \frac{(a+c)(G_1b_1 + G_{21}b_2 + G_{22}(b_2 + J\frac{m}{k}(1 - \cos(\sqrt{\frac{k}{m}}t))) + \frac{G_1}{g}Jh_{g1} + \frac{G_{21}}{g}Jh_{21} + Jmh_{22}(1 - \cos(\sqrt{\frac{k}{m}}t)))h_{22}}{L L_2}$$

$$Z_B(t, J) = \frac{G_1a_1 + G_{21}a_2 + G_{22}(a_2 - J\frac{m}{k}(1 - \cos(\sqrt{\frac{k}{m}}t))) - \frac{G_1}{g}Jh_{g1} - \frac{G_{21}}{g}Jh_{21} - Jmh_{22}(1 - \cos(\sqrt{\frac{k}{m}}t))h_{22}}{L_2} \quad (1)$$

Аналіз рівнянь (1) показав, що нормальні реакції опорної поверхні на осі автопоїзда залежать не тільки від його уповільнення, а і від переміщення рідкого вантажу і виникаючих при цьому сил інерції у частково заповненій цистерні. Результати розрахунків наведені на діаграмах сил інерції (рис. 1) для різного ступеня заповнення і типу цистерни.

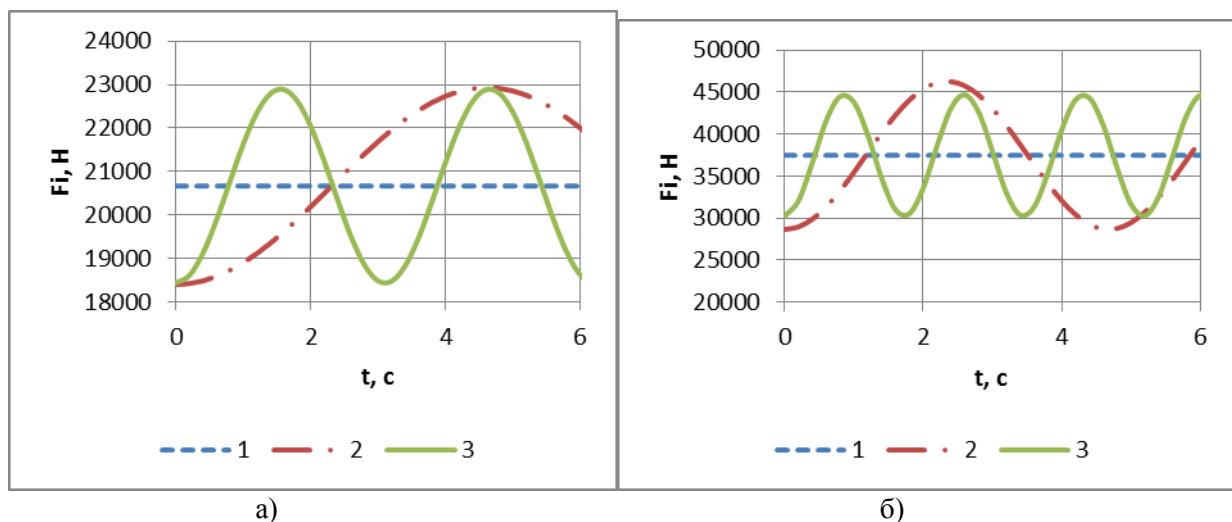


Рисунок 1 – Діаграма сил інерції під час постійного уповільнення $J = 1 \frac{m}{c^2}$

за 20% (а) і 80% (б) заповнення цистерн:

1 – $F_{is1}(t)$, відповідає гальмуванню з еквівалентним жорстким вантажем;

2 – $F_{is3}(t)$, відповідає гальмуванню з трисекційною цистерною

3 – $\sum F_i$, відповідає гальмуванню з односекційною цистерною.

Аналіз рівнянь, що визначають нормальні реакції опорної поверхні на осі автопоїзда і сил інерції, що виникають від переміщення рідкого вантажу в частково заповненій цистерні, показав що найбільша зміна реакції має місце для передньої осі автомобіля-тягача. Для цієї осі визначені нормальні реакції опорної поверхні для різного ступеня заповнення цистерни і для автопоїзда з жорстким вантажем, рис.2. Під еквівалентним жорстким вантажем мається на увазі вантаж, який є нерухомим відносно тіла цистерни, має масу, яка дорівнює масі вантажу в односекційній цистерні або сумі мас вантажу в трисекційній цистерні, а також центр мас, що співпадає з центром мас зазначених вантажів у стані спокою.

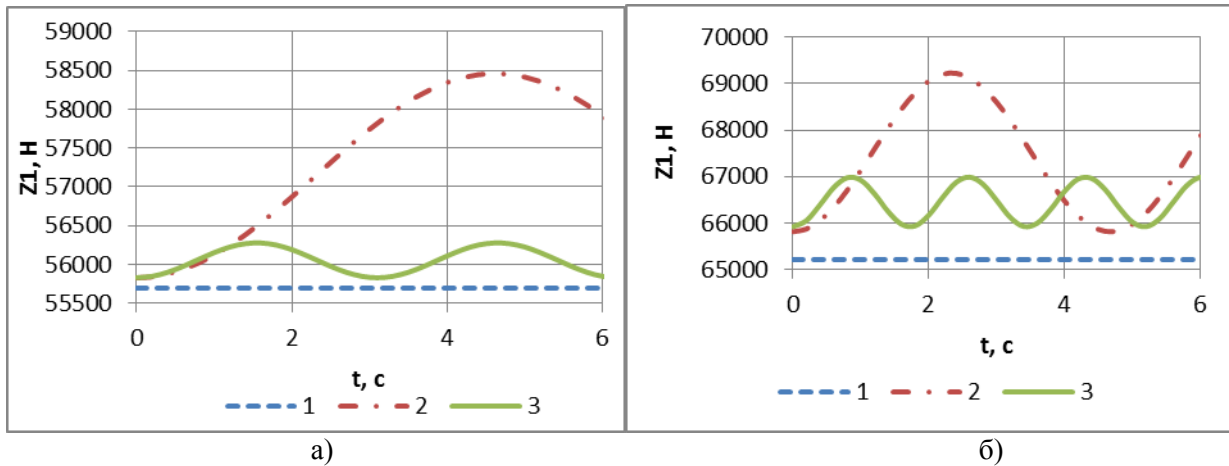


Рисунок 2 - Нормальна реакція опорної поверхні під час постійного уповільнення $J = 1 \frac{m}{c^2}$

за 20% (а) і 80% (б) заповнення цистерн:

1 – $F_{is1}(t)$, відповідає гальмуванню з еквівалентним жорстким вантажем;

2 – $F_{is3}(t)$, відповідає гальмуванню з трисекційною цистерною

3 – $\sum F_i$, відповідає гальмуванню з односекційною цистерною.

Як видно з результатів дослідження сил інерції (рис. 1) – розділення внутрішнього об'єму цистерни на окремі секції майже не впливає на максимальне значення сили інерції у разі гальмування автопоїзда із сталим уповільненням, але при цьому частота коливань цієї сили є більшою. Пояснюється це тим, що сумарна маса рухомого вантажу трьох окремих секцій еквівалентна масі рухомої частини односекційної цистерни, але при цьому в менших секціях вантаж зустрічає більший опір своєму руху відносно тіла цистерни.

Щодо нормальної реакції опорної поверхні (рис. 2) – розділення цистерни на секції сприяє значному зменшенню коливання навантаження на передню вісь тягача. Пояснюється це тим, що центр мас рухомої частини вантажу односекційної цистерни піддається більшому переміщенню відносно осей автопоїзда, ніж центри мас в трьох окремих секціях через їх менший поздовжній розмір.

Після визначення сил інерції і нормальних реакцій опорної поверхні на осі автопоїзда розглянемо баланс поздовжніх сил в поздовжньому напрямку під час гальмування:

$$\sum P = \sum F_i \quad (2)$$

де $\sum P$ – сума поздовжніх сил, що діють на автопоїзд;

$\sum F_i$ – сума сил інерції складових автопоїзда.

Розглянемо автопоїзд, що екстрено гальмує на рівній горизонтальній поверхні. Автопоїзд обладнаний системою антиблокування коліс та системою розподілення гальмівного зусилля, які дозволяють під час гальмування максимально (прийемо ідеально) використовувати силу зчеплення кожного колеса з опорною поверхнею.

Тоді:

$$\sum P = P_r + P_{ок} + P_{оп} \quad (3)$$

де P_r – сила гальмування;

$P_{ок}$ – сила опору коченню коліс;

$P_{он}$ – сила опору руху повітрям.

З точки зору вивчення динамічного впливу рідкого вантажу силами опору коченню коліс та опору руху повітрям можна знехтувати. Сила гальмування при прийнятих умовах:

$$P_f = Z_1\mu + Z_2\mu + Z_3\mu = (Z_1 + Z_2 + Z_3)\mu \quad (4)$$

де Z_1, Z_2 – нормальні реакції опорної поверхні на передній та задній осях автомобіля-тягача, відповідно;

Z_3 – нормальна реакція опорної поверхні на візок напівпричепа;

μ – коефіцієнт зчеплення коліс з опорною поверхнею.

Для випадку повністю заповненої цистерни (перевезення жорсткого вантажу), враховуючи (3 і 4), вираз (2) отримує такий вигляд:

$$(Z_1 + Z_2 + Z_3)\mu = \frac{(G+G_1+G_2)}{g}J, \quad (5)$$

де G, G_1, G_2 – сила тяжіння, відповідно автомобіля-тягача, напівпричепа та вантажу.

Так як сума нормальних реакцій опорної поверхні на всі осі автопоїзда дорівнює силі тяжіння автопоїзда, то прискорення при екстремому гальмуванні повністю заповненої цистерни визначиться як :

$$J = g\mu \quad (6)$$

У випадку перевезення рідкого вантажу маса рухомої його частини не приймає участі в силі інерції автопоїзда повної мірою, оскільки продовжує рух із власним прискоренням, тобто вираз (4) набуває вигляду:

$$(Z_1 + Z_2 + Z_3)\mu = \left(\frac{G+G_1+G_2}{g} - m \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right) \right) J \quad (7)$$

Уповільнення екстремого гальмування автопоїзда з рідким вантажем стає залежним від часу t з моменту початку гальмування і визначиться як:

$$J(t) = \frac{g\mu}{\frac{mg \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right)}{1 - \frac{G+G_1+G_2}{g}}} \quad (8)$$

Аналіз виразів (5) та (8) показує, що уповільнення автопоїзда при перевезення рідкого вантажу з моменту початку гальмування буде більшим ніж уповільнення з жорстким вантажем до моменту, коли $\cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right)$ не набуде значення ≤ 0 , що підтверджують графіки на рисунках 3, 4, 5, складені для автопоїзда із 20%, 50% та 80% ступенями наповнення цистерни. Графіки побудовані у вигляді залежності уповільнення від пройденого шляху гальмування $J(S)$.

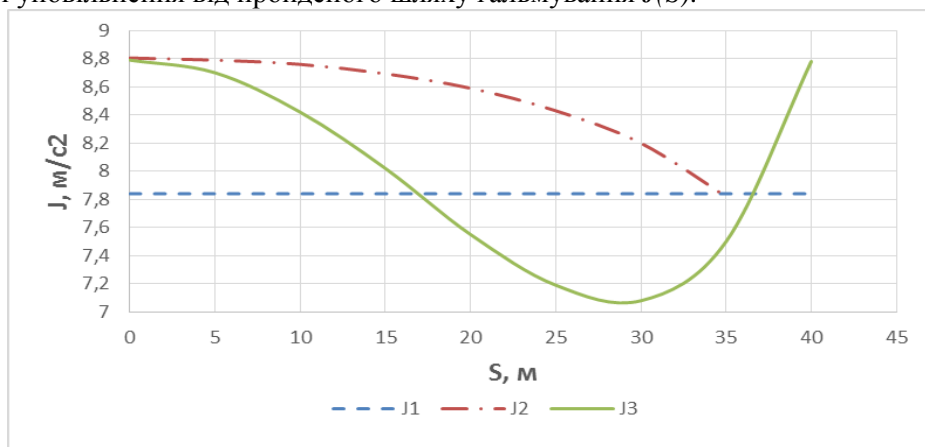


Рисунок 3 – Графік уповільнення автопоїзда в залежності від пройденого шляху гальмування із 20% ступенем заповнення цистерн:

$J1$ – гальмування автопоїзда з еквівалентним жорстким вантажем,

J_2 – гальмування автопоїзда з одnoseкційною цистерною,

J_3 – гальмування автопоїзда з трисекційною цистерною.

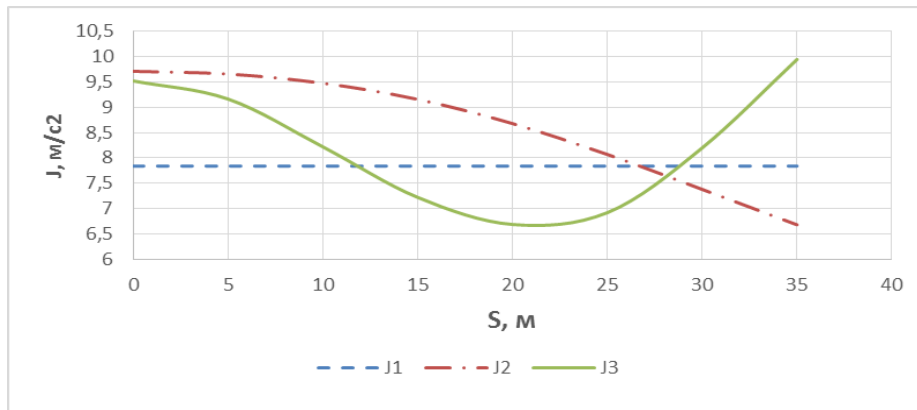


Рисунок 4 – Графік уповільнення автопоїзда в залежності від пройденого шляху гальмування із 50% ступенем заповнення цистерн:

J_1 – гальмування автопоїзда з еквівалентним жорстким вантажем,

J_2 – гальмування автопоїзда з одnoseкційною цистерною,

J_3 – гальмування автопоїзда з трисекційною цистерною.

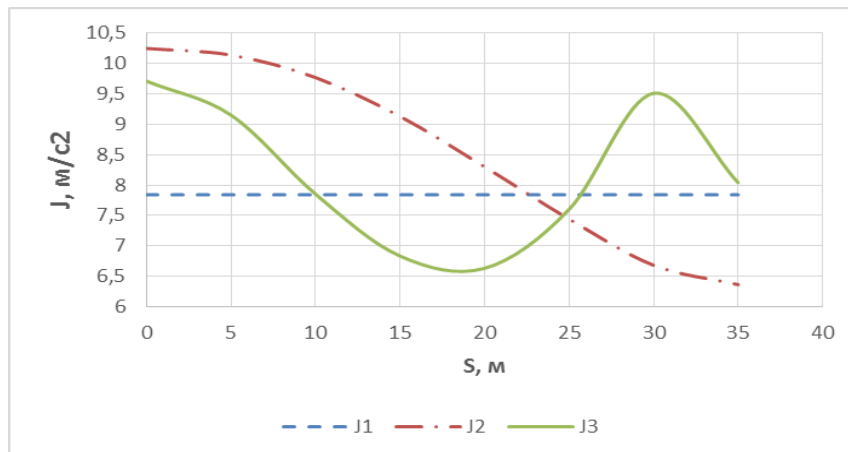


Рисунок 5 – Графік уповільнення автопоїзда в залежності від пройденого шляху гальмування із 80% ступенем заповнення цистерн:

J_1 – гальмування автопоїзда з еквівалентним жорстким вантажем,

J_2 – гальмування автопоїзда з одnoseкційною цистерною,

J_3 – гальмування автопоїзда з трисекційною цистерною.

Наведені графіки показують, що незалежно від ступеня наповнення цистерни, тобто маси вантажу, уповільнення автопоїзда з еквівалентним жорстким вантажем при прийнятих умовах відповідає виразу (8). У той же час для цистерни з рідким вантажем ступень наповнення впливає на значення уповільнення у початковий момент гальмування, і при цьому, чим більша маса рідкого вантажу – тим більше початкове уповільнення. Також на початок уповільнення впливає поділ цистерни на секції – початок гальмування одnoseкційної цистерни більш інтенсивний, ніж у трисекційної. Пояснити це можна тим, що у такий момент маса рідкого вантажу розподілена по осях автопоїзда повністю і, відповідно до виразу (6), прямопропорційно приймає участь у створенні сили гальмування P_r . А так, як частина рідкого вантажу деякий час продовжує вперед по ходу руху і уповільненню підлягає не вся маса автопоїзда повністю, то чим більша маса рухомої частини і більший простір для її руху – тим менша сила інерції автопоїзда (рис.1,2). Оскільки початковий момент гальмування відбувається при найбільшій швидкості руху, можна зробити припущення, що таке явище може мати призвести до зменшення гальмівного шляху автопоїзда.

Шлях гальмування автопоїзда визначиться як

$$S_{\tau} = \frac{v_0^2}{2j_{\text{ср}}} \quad (9)$$

З урахуванням (6) на рисунках 6-8 наведено діаграми гальмівного шляху автопоїзда з різними цистернами та різним ступенем наповнення

Аналіз діаграм показує, що рух рідини відносно цистерни призводить до зменшення гальмівного шляху, що підтверджує попередні припущення. Поділ цистерни на секції, як і ступень її заповнення також впливають на довжину шляху – найкоротший у автопоїзда з односекційною цистерною із 50% наповненням.

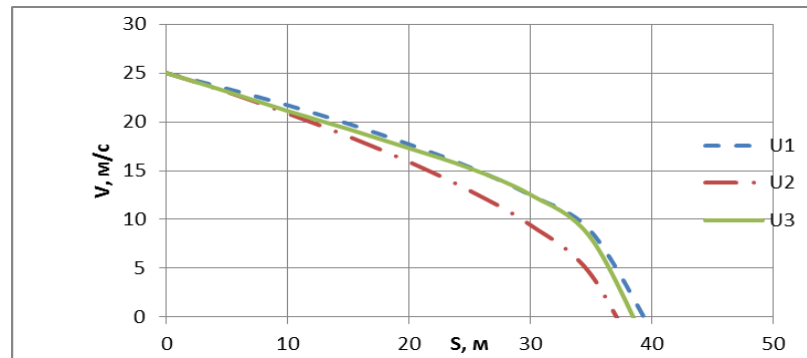


Рисунок 6 - Діаграми гальмівного шляху із 20% ступенем заповнення цистерн:

U_1 – відповідає гальмуванню з еквівалентним жорстким вантажем,

U_2 – відповідає гальмуванню з односекційною цистерною,

U_3 – відповідає гальмуванню з трисекційною цистерною.

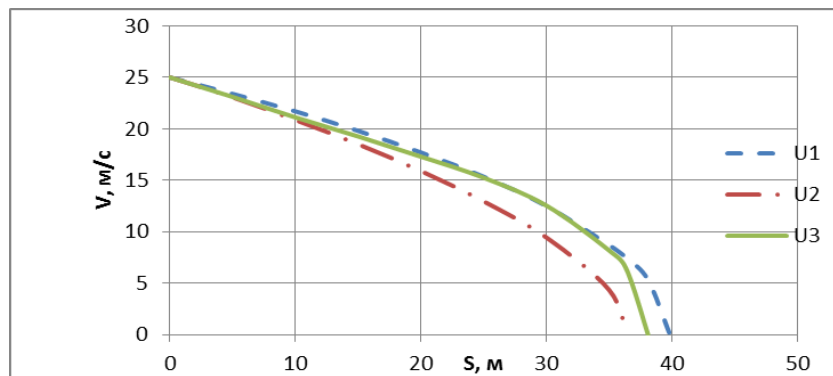


Рисунок 7 - Діаграми гальмівного шляху із 50% ступенем заповнення цистерн:

U_1 – відповідає гальмуванню з еквівалентним жорстким вантажем,

U_2 – відповідає гальмуванню з односекційною цистерною,

U_3 – відповідає гальмуванню з трисекційною цистерною.

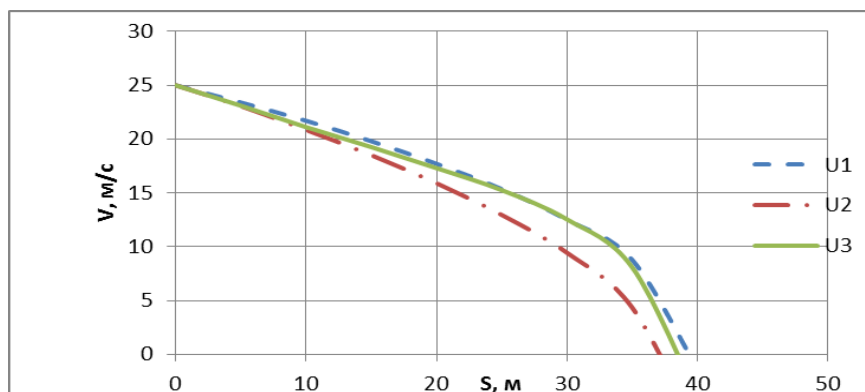


Рисунок 8 - Діаграми гальмівного шляху із 50% ступенем заповнення цистерн:

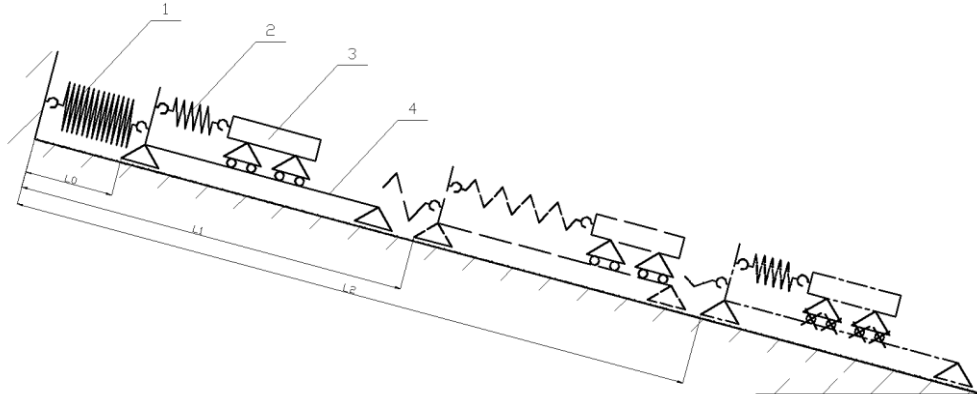
U_1 – відповідає гальмуванню з еквівалентним жорстким вантажем,

U_2 – відповідає гальмуванню з односекційною цистерною,

U_3 – відповідає гальмуванню з трисекційною цистерною.

Аналіз діаграм показує, що рух рідини відносно цистерни призводить до зменшення гальмівного шляху, що підтверджує попередні припущення. Поділ цистерни на секції, як і ступень її заповнення також впливають на довжину шляху – найкоротший у автопоїзда з односекційною цистерною із 50% наповненням.

Властивість системи з рухомим вантажем скорочувати гальмівний шлях підтверджується простим дослідом, який імітує гальмування транспортного засобу із заблокованими колесами. На похилу поверхню встановлюється рухома платформа 4 (рисунок 9), на якій за допомогою пружини 2 закріплюється вантаж 3. Вантаж має можливість рухатись вздовж платформи завдяки застосування рухливих шарнірів. Також рух вантажу відносно платформи можна заблокувати. Сама платформа підвішена на пружині 1 і рухається вздовж похилої поверхні на опорах тертя.



> x

Рисунок 9 – До визначення гальмівного шляху моделі транспортного засобу з рухомим та нерухомим вантажем:

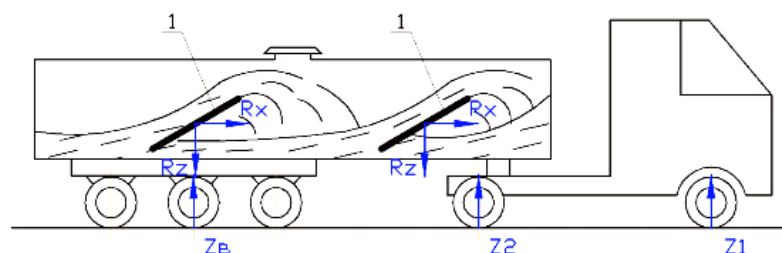
- 1 - пружина рухомої платформи,
- 2 – пружина вантажу,
- 3 – вантаж,
- 4 – рухома платформа.

Рухому платформу спускають з відстані L_0 по черзі з рухомим та заблокованим вантажем. З рухомим вантажем платформа спускається на відстань L_1 , із заблокованим - на відстань L_2 . В результаті відстань L_2 суттєво перевищує відстань L_1 .

З точки зору збереження енергії скорочення гальмівного шляху в цьому випадку пояснюється тим, що частина сумарної кінетичної енергії системи з рухомим вантажем під час гальмування витрачається на подолання опору внутрішньому переміщенню вантажу.

ОБГОВОРЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Слід зазначити, що математичні моделі, на основі яких побудовані діаграми, не враховують ефекту досягання вільної поверхні верхньої стінки цистерни, що призводить до зменшення $Z_1 + Z_2 + Z_3$ та, відповідно, сили гальмування P_f . Це може призвести до висновку, що може існувати спосіб перетворити енергію переміщення рідини всередині цистерни на позитивний з точки зору гальмування ефект. Наприклад, якщо розташувати хвилерізи всередині цистерни з нахилом, як показано на рисунку 10.



—> x

Рисунок 10 - Схема переміщення рідини всередині цистерни для підвищення ефективності гальмівних показників автопоїзда з допомогою хвилерізів (поз.1), які розташовані під нахилом

При гальмуванні рідина, зміщуючись вперед, набігає на похилі хвилерізи цистерни, завдяки чому на них виникає реакція R . Вертикальна складова реакції R_z спрямована вниз, чим збільшує суму реакцій опорної поверхні $Z_1 + Z_2 + Z_3$, що, у свою чергу, збільшує гальмівну силу P_f і зменшує гальмівний шлях автопоїзда. Проте цей ефект потребує подальшого дослідження.

ВИСНОВКИ

1. Визначені нормальні реакції опорної поверхні для різного ступеня заповнення цистерни і для автопоїзда з жорстким вантажем. При цьому показано, що переміщення рідкого вантажу в частково заповненій односекційній і трисекційній цистерні призводить до найбільшої зміни реакції для передньої осі автомобіля-тягача.
2. Розділення внутрішнього об'єму цистерни на окремі секції майже не впливає на максимальне значення сили інерції у разі гальмування автопоїзда із сталим уповільненням, але при цьому частота коливань цієї сили є більшою.
3. Показано, що для цистерни з рідким вантажем ступінь наповнення цистерни впливає на значення уповільнення у початковий момент гальмування. При цьому, чим більша маса рідкого вантажу – тим більше початкове уповільнення. Поділ цистерни на секції впливає на початок гальмування і для односекційної цистерни він більш інтенсивний, ніж у трисекційної.
4. Встановлено, що рух рідини відносно цистерни призводить до зменшення гальмівного шляху. Поділ цистерни на секції, як і ступінь її заповнення також впливають на довжину шляху – найкоротший у автопоїзда з односекційною цистерною із 50% наповненням.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Попелиш Д.М. До визначення поперечної стійкості автомобіля-цистерни //Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки» Науковий журнал. Випуск3(53), 2022. – С. 291-300 DOI: 10.33744/2308-6645-2022-3-53-291-300
2. Rakheja, S. and Wang, Z-, Analysis of Braking Process of a Partially Filled Tractor Tank Semitrailer, Advances in Transportation Systems, CSME Forum SCGM, pp. 326-333, 1996
3. Ranganathan, R. and Ying, Y. S., Impact of Liquid Load Shift on the Braking Characteristics of Partially Filled Tank Vehicles, Vehicle System Dynamics, Vol. 26, pp. 223-240,1996 ISSN: 0042-3114 EISSN: 1744-5159 Serial URL: <https://www.tandfonline.com/toc/nvsv20/current>
4. Ranganathan, R., Ying, Y. and Miles, J. B., Development of a Mechanical Analogy Model to Predict the Dynamic Behavior of Liquids in Partially Filled Tank Vehicles, SAE Paper No. 942307, 1994 <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/942307/>
5. Ibrahim, I. M., El-Nashar, M. A. and Younes, Y. K., Ride Behavior of Trucks Transporting Liquids, Heavy Vehicle Systems, Int. J. of Vehicle Design, Vol. 5, NOS. 3/4, 1998, pp. 261-276, 1998 <http://dx.doi.org/10.1504/IJHVS.1998.054617>
6. Bogomaz, G. L., Markova, O. M. and Chernomashentseva, Y. G., Mathematical Modeling of Vibrations and Loading of Railway Tanks Taking into Account the Liquid Cargo Mobility, Vehicle System Dynamics, Vol. 30, pp. 285-294, 1998 ISSN: 0042-3114 EISSN: 1744-5159 Serial URL: <https://www.tandfonline.com/toc/nvsv20/current> <https://cyberleninka.ru/article/n/ustoychivost-pozharnoy-avtotsisterny-protiv-zanosy-pri-tormozhenii>
7. Сахно В.П. Автоматичне виявлення режиму гальмування автопоїзда з частково наповненою цистерною /В.П.Сахно, Д.М.Попелиш, С.М.Томчук//Науково-виробничий журнал Автошляховик України, 2020, №4. – С.33-39. DOI: 10.33868/0365-8392-2020-4-264-33-39
8. Сахно В.П. Огляд наукових досліджень щодо динамічного впливу рідини на рухомі резервуари, зокрема цистерни /В.П.Сахно, Д.М.Попелиш, С.М.Томчук//Науково-виробничий журнал Автошляховик України, 2020, №3. – С.12-15. DOI: 10.33868/0365-8392-2020-3-263-12-15 <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskaya-nagruzhennost-konstruktsii-tsisterny-pri-tormozhenii>
9. Xue-lian Zheng, Hao Zhang, Yuan-yuan Ren, Ze-hong Wei and Xi-gang Song. Rollover stability analysis of tank vehicles based on the solution of liquidsloshing in partially filled tanks//Advances in Mechanical Engineering2017, Vol. 9(6) 1–26 DOI: 10.1177/1687814017703894
10. [Tran Van Nhu](#), [Nguyen Xuan Ngoc](#), [Vu Van Tan](#), [Dang Tien Phuc](#) Rollover stability analysis of liquid tank truck taking into account the road profiles//[Journal of Applied Engineering Science](#) 2022, vol. 20, br. 4, str. 1133-1142 DOI: [10.5937/jaes0-36578](https://doi.org/10.5937/jaes0-36578)
11. Глущенко В. В. Энергетический подход к оценке устойчивости автомобилей-цистерн против опрокидывания / В. В. Глущенко, Р. О. Кайдалов, М. А. Подригало, С. А. Соколовский

// Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. - 2015. - Вип. 2. - С. 32-38 http://books.ndcngu.co.ua/statti_NDL_2/ZNP_1_2015_Podrigalo.pdf

12. Kang, X., Rakheja, S. and Stiharu, I., Directional dynamics of a partly-filled tank vehicle under braking and steering, SAE technical paper no.2000-01-3477 <https://doi.org/10.4271/2000-01-3477>

13. Кузнецов Р. М. Вплив конструктивних і експлуатаційних факторів на стійкість руху триланкового причіпного автопоїзда / Р. М. Кузнецов, В. В. Лотиш, І. С. Мурований, В. П. Онищук // Вісник Східноукраїнського національного університету імені В. Даля. – 2008. – № 7 (125). – С. 84-87.

14. Кравчук П. М. Нормування гальмівних властивостей колісних транспортних засобів в Україні / П. М. Кравчук, Р. Ю. Нілов, Ю. В. Бабін // Науково-виробничий журнал Автомобільний транспорт: У реаліях міжнародного права. – 2014. – № 2(238). – С. 8-10.

15. До стійкості автоцистерни в гальмівному режимі / Д.М. Попелиш, Ю.М. Селюк, С.М. Томчук// Автошляховик України. – 2019. -№1 (257) С.27-32.-doi:10.33868/0365-8392-2019-1-257-27-32

REFERENCES

1. Popelysh D.M. Do vyznachennya poperechnoyi stiykosti avtomobilya-tsysterny //Visnyk Natsional'noho transportnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky» Naukovyy zhurnal. Vypusk3(53), 2022. – S. 291-300 DOI: 10.33744/2308-6645-2022-3-53-291-300

2. Rakheja, S. and Wang, Z-, Analysis of Braking Process of a Partially Filled Tractor Tank Semitrailer, Advances in Transportation Systems, CSME Forum SCGM, pp. 326-333, 1996

3. Ranganathan, R. and Ying, Y. S., Impact of Liquid Load Shift on the Braking Characteristics of Partially Filled Tank Vehicles, Vehicle System Dynamics, Vol. 26, pp. 223-240,1996 ISSN: 0042-3114 EISSN: 1744-5159 Serial URL: <https://www.tandfonline.com/toc/nvsv20/current>

4. Ranganathan, R., Ying, Y. and Miles, J. B., Development of a Mechanical Analogy Model to Predict the Dynamic Behavior of Liquids in Partially Filled Tank Vehicles, SAE Paper No. 942307, 1994 <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/942307/>

5. Ibrahim, I. M., El-Nashar, M. A. and Younes, Y. K., Ride Behavior of Trucks Transporting Liquids, Heavy Vehicle Systems, Int. J. of Vehicle Design, Vol. 5, NOS. 3/4, 1998, pp. 261-276, 1998 <http://dx.doi.org/10.1504/IJHVS.1998.054617>

6. Bogomaz, G. L., Markova, O. M. and Chernomashentseva, Y. G., Mathematical Modeling of Vibrations and Loading of Railway Tanks Taking into Account the Liquid Cargo Mobility, Vehicle System Dynamics, Vol. 30, pp. 285-294, 1998 ISSN: 0042-3114 EISSN: 1744-5159 Serial URL: <https://www.tandfonline.com/toc/nvsv20/current>

7. Sakhno V.P. Avtomatychno vyivlennia rezhymu rezhymu halmuvannia avtopoizda z chastkovo napovnenoiu tsysternoiu /V.P.Sakhno, D.M.Popelysh, S.M.Tomchuk//Naukovo-vyrobnychi zhurnal Avtoshliakhovyk Ukrainy, 2020, №4. – S.33-39. DOI: 10.33868/0365-8392-2020-4-264-33-39

8. Sakhno V.P. Ohliad naukovykh doslidzen shchodo dynamichnoho vplyvu ridyny na rukhomi rezervuary, zokrema tsysterny /V.P.Sakhno, D.M.Popelysh, S.M.Tomchuk//Naukovo-vyrobnychi zhurnal Avtoshliakhovyk Ukrainy, 2020, №3. – S.12-15. DOI: 10.33868/0365-8392-2020-3-263-12-15 <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskaya-nagruzhennost-konstruktsii-tsisterny-pri-tormozhenii>

9 Xue-lian Zheng, Hao Zhang, Yuan-yuan Ren, Ze-hong Wei and Xi-gang Song. Rollover stability analysis of tankvehicles based on the solution of liquidsloshing in partially filled tanks//Advances in Mechanical Engineering2017, Vol. 9(6) 1–26 DOI: 10.1177/1687814017703894

10. [Tran Van Nhu](#), [Nguyen Xuan Ngoc](#), [Vu Van Tan](#), [Dang Tien Phuc](#) Rollover stability analysis of liquid tank truck taking into account the road profiles//[Journal of Applied Engineering Science](#) 2022, vol. 20, br. 4, str. 1133-1142 DOI: [10.5937/jaes0-36578](https://doi.org/10.5937/jaes0-36578)

11. Hlushchenko V. V. Enerhetycheskyi podkhod k otsenke ustoichyvosty avtomobylei-tsystern protyv oprokudynvanyia / V. V. Hlushchenko, R. O. Kaidalov, M. A. Podryhalo, S. A. Sokolovskiy // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Natsionalnoi hvardii Ukrainy. - 2015. - Vyp. 2. - S. 32-38

12. Kang, X., Rakheja, S. and Stiharu, I., Directional dynamics of a partly-filled tank vehicle under braking and steering, SAE technical paper no.2000-01-3477 <https://doi.org/10.4271/2000-01-3477>

13. Kuznietsov R. M. Vplyv konstruktyvnykh i ekspluatatsiinykh faktoriv na stiiikist rukhu trylankovoho prychipnoho avtopoizda / R. M. Kuznietsov, V. V. Lotysh, I. S. Murovaniy, V. P. Onyshchuk // Visnyk Skhidnoukrainskoho natsionalnoho universytetu imeni V.Dalia. – 2008. – № 7 (125). – S. 84-87.

14. Kravchuk P. M. Normuvannia halmivnykh vlastyvostei kolisnykh transportnykh zasobiv v Ukraini / P. M. Kravchuk, R. Yu. Nilov, Yu. V. Babin // Naukovo-vyrobnychi zhurnal Avtomobilnyi transport: U realiakh mizhnarodnoho prava. – 2014. – № 2(238). – S. 8-10.

15. Do stiiikosti avtotsysterny v halmivnomu rezhymi / D.M. Popelysh, Yu.M. Seliuk, S.M. Tomchuk// Avtoshliakhovyk Ukrainy. – 2019. -№1 (257) S.27-32.-doi:10.33868/0365-8392-2019-1-257-27-32

V. Sakhno, I. Murovani, V. Poljakov, D.Popelysh. To determine the braking properties of a vehicle with a partially full tank

The increase in the volume of transportation and the expansion of the nomenclature of transported goods require the improvement of the structure and productivity of motor vehicles (ATZ). A significant reserve for improving the efficiency of the use of ATZ is an increase in the number of goods transported by road trains without a significant increase in their number on highways. This problem can be solved with the help of high-tonnage road trains, including multi-link ones. In this regard, one of the most important tasks is the need to provide such road trains with the required level of braking properties.

The paper shows that with a partially filled tank, the dynamic qualities of wheeled vehicles change due to large shifts in the center of mass of the cargo in the tank, which leads to additional loads acting on the structure of the tank, as well as a significant decrease in the stability, controllability and braking properties of vehicles, which are determined by the normal reactions of the support surface on its wheels (axles). The paper defines the normal reactions of the support surface for different levels of tank filling and for a road train with a rigid load. The division of the internal volume of the tank into separate sections almost does not affect the maximum value of the inertia force in the case of braking of a road train with constant deceleration, but at the same time the frequency of fluctuations of this force is greater. At the same time, the movement of the liquid relative to the tank leads to a reduction in the braking distance. The division of the tank into sections, as well as the degree of its filling, also affect the length of the journey - the shortest in a road train with a single-section tank with 50% filling.

Key words: road train, tank, degree of filling, sectionality of the tank, normal reaction, deceleration, braking distance

САХНО Володимир Прохорович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автомобілів, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: sakhno@ntu.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-5144-7131>

МУРОВАНИЙ Ігор Сергійович, кандидат технічних наук, доцент, декан факультету транспорту та механічної інженерії Луцького національного технічного університету, e-mail: igor_intu@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-9749-980X>

ПОЛЯКОВ Віктор Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри автомобілів, Національний транспортний університет, Київ, Україна, e-mail: poljakov_2006@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-7042-3066>

ПОПЕЛИШ Денис Михайлович, магістр, Національний транспортний університет, аспірант кафедри автомобілів. e-mail: popelish@ukr.net, тел. +380677921408 <https://orcid.org/0000-0001-9506-6421>

Volodymyr SAKHNO, Doctor of Technical Science, Professor, Head of Automobiles Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: sakhno@ntu.edu.ua. <https://orcid.org/0000-0002-5144-7131>

Igor MUROVANYI, PhD. in Engineering, Assoc. Professor, Dean of the Faculty of Transport and Mechanical Engineering, Lutsk National Technical University, e-mail: igor_intu@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0002-9749-980X>

Victor POLJAKOV, Ph.D. in Technical Science, associate professor, professor of Automobiles Department, National Transport University, Kyiv, Ukraine, e-mail: poljakov_2006@ukr.net. <https://orcid.org/0000-0001-7042-3066>

Denis POPELYCH, magistr of transport, National Transport University, postgraduate student of Automobiles Department, e-mail: popelish@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-9506-6421>

DOI 10.36910/automash.v1i20.1052