

Scientific and technical journal «Technogenic and Ecological Safety»

RESEARCH ARTICLE
OPEN ACCESS

УДК 504.5

ВРАХУВАННЯ НЕРІВНОСТЕЙ ДОРОЖНЬОГО ПОКРИТТЯ ПРИ ТРАНСПОРТУВАННІ НЕБЕЗПЕЧНИХ РІДИН

В. В. Голота

ад'юнкт

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7461-4376>Національний університет цивільного захисту України
вул. Онопrienка, 8, м. Черкаси, 18034, УкраїнаDOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2026.1.5>

Отримано: 1 травня 2026

Прийнято: 29 травня 2026

Опубліковано: 31 травня 2026

Цитувати як: Голота В. В. Врахування нерівностей дорожнього покриття при транспортуванні небезпечних рідин. *Техногенно-екологічна безпека*. 2026. Вип. 19(1/2026). С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2026.1.5>

Ліцензія відкритого доступу: Creative Commons Attribution 4.0 International License

Анотація. У роботі розглядається вплив вертикальних коливань, що виникають під час руху автоцистерни по хвилястому або нерівному дорожньому покриттю, на динаміку рідини всередині резервуара. Показано, що взаємодія коліс транспортного засобу з профілем дороги викликає вертикальні прискорення, які змінюють ефективне поле сили тяжіння і виступають додатковим механізмом збудження коливань вільної поверхні рідини.

Метою роботи є розробка математичної моделі процесу транспортування небезпечних рідин, що враховує нерівності дорожнього покриття для мінімізації негативного впливу рідин на навколишнє середовище.

Новизна: набули подальшого розвитку підходи до визначення впливів стану дорожнього покриття на безпеку зберігання та транспортування небезпечних рідин в резервуарах.

Для опису динаміки плескань використовується неоднорідне рівняння типу Матьє-Хілла. Аналіз стійкості руху рідини проводиться з використанням діаграми Айнса-Стретта, що дозволяє визначити області стійких і нестійких режимів залежно від параметрів вертикального збудження та власних частот коливань рідини.

Практичне значення отриманих результатів полягає у використанні розробленої математичної моделі для оцінювання безпечних режимів руху автоцистерн, визначення небезпечних ділянок дороги та встановлення безпечних маршрутів транспортування та зменшення ризику аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних рідин.

Наведено результати розрахунків руху рідини в жорсткій циліндричній оболонці за різних значень амплітуд і частот зовнішнього впливу, а також проаналізовано фазові портрети руху вільної поверхні. Встановлено, що певні поєднання швидкості руху транспортного засобу та характеристик дорожніх нерівностей здатні викликати посилення плескання навіть при незначній нерівності покриття.

Зроблено висновок про необхідність врахування впливу вертикальних та комбінованих коливань при оцінці безпеки експлуатації автоцистерн та перевезення небезпечних рідин.

Ключові слова: автоцистерна, плескання рідини, екологічна безпека, навколишнє середовище, довкілля, небезпечний вплив рідини, транспортування небезпечних рідин.

Постановка проблеми

При перевезенні небезпечних рідин мають місце аварії, що призводять не тільки до економічних втрат, але і до забруднення навколишнього середовища та людських жертв. Трапляються вони не тільки через недотримання вимог безпеки перевезень, а й унаслідок недосконалості конструкцій цистерн, в яких відсутні ефективні засоби гасіння інерційних сил рідини, що виникають під час руху нерівними дорогами, на схилах, при гальмуванні, рушанні з місця та поворотах транспортних засобів.

У роботі розглядаються небезпечні рідини, до яких належать нафтопродукти, легкозаймисті рідини, токсичні хімічні речовини та інші рідкі небезпечні вантажі, транспортування яких потребує підвищених заходів безпеки. Плескання рідини змінює розподіл маси всередині цистерни, створює додаткові динамічні навантаження на стінки резервуара та може

погіршувати стійкість транспортного засобу під час руху нерівною дорогою, гальмування або повороту.

Потрапляння небезпечних рідин з автоцистерн до навколишнього середовища може мати серйозні наслідки. Зокрема відбувається забруднення поверхневих і підземних вод, забруднення ґрунту та атмосферного повітря, вибухи та пожежі. Вирішення цієї проблеми вимагає термінових заходів для запобігання та ліквідації наслідків впливу [1–3].

Метою роботи є розробка математичної моделі процесу транспортування небезпечних рідин, що враховує нерівності дорожнього покриття для мінімізації негативного впливу рідин на навколишнє середовище.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Деякі вчені, такі як Верн С. [4,5], Серікова О. [6,7], Чен Ю. [8], Стрельнікова Е. [9], Дегтярьов К. [7], Чоудхари Н. [10–12] та інші, досліджували процес

розплескування рідини в резервуарах та ефективність використання перегородок [13,14]. Було виявлено, що встановлені перегородки можуть ефективно пригнічувати розбризкування.

Вплив різних матеріалів на їх стійкість та форму резервуарів досліджувався в [15–17]. Використання нанокомпозитів як матеріалу для резервуарів для зберігання було розглянуто в роботах [18,19]. Однак ці дослідження проводилися лише для стаціонарних резервуарів.

Мазхар Фатахі досліджував напівзакопані резервуари, їх стан та умови експлуатації [20]. Метод виявлення пошкоджень у резервуарах був використаний Енгітою та ін. та Стойческу та ін. [21,22].

Вплив на навколишнє середовище небезпечних рідин, що зберігаються в резервуарах, розглядався в роботах [1,23], а надзвичайні ситуації розглядав Яцишин А. [24].

Транспортування небезпечних рідин включає численні фізичні, хімічні та екологічні аспекти, які можуть значно відрізнитися залежно від конкретного застосування (тип рідини, конструкція резервуара, зовнішні умови тощо). Це ускладнює розробку універсальних математичних моделей.

Застосовані математичні моделі дозволяють нам досліджувати різні аспекти транспортування небезпечних рідин, включаючи стан резервуарів, умови транспортування, ризики витоків та аварій, а також потенційний вплив на здоров'я людини та навколишнє середовище. Математичне моделювання дозволяє створювати точні прогнози поведінки резервуарів під час транспортування, враховуючи різні фактори, такі як зміни температури, механічні навантаження тощо. Це дозволяє фахівцям проводити експертне дослідження стану резервуарів та своєчасно виявляти потенційні проблеми, що може значно знизити ризик аварій. Моделі можна використовувати для оцінки ефективності різних методів герметизації, матеріалів резервуарів, а також для розробки оптимальних маршрутів транспортування, які мінімізують ризики зіткнення з густонаселеними або екологічно чутливими районами.

Великий обсяг даних про умови транспортування, стан резервуарів та можливі аварії може бути складним для аналізу. Використання математичних моделей, збір та обробка даних можуть полегшити експертні дослідження.

Проблема полягає в необхідності розробки надійних математичних моделей, які б ефективно вирішували проблеми, пов'язані з транспортуванням небезпечних рідин у резервуарах, та забезпечували безпеку та ефективність цих процесів.

Отже, наявні дослідження достатньо повно розглядають плескання рідини в стаціонарних резервуарах, сейсмічний вплив, використання перегородок і демпферів. Водночас питання впливу нерівностей дорожнього покриття на параметричне збудження рідини в автоцистерні залишається недостатньо розкритим. Саме це визначає напрям цього дослідження.

Новизна: набули подальшого розвитку підходи до визначення впливів стану дорожнього покриття на безпеку зберігання та транспортування небезпечних рідин в резервуарах.

Методи та матеріали

Коли автоцистерна рухається хвилястою (або нерівною) дорогою, транспортний засіб зазнає вертикальних коливань, викликаних взаємодією між колесами та профілем дороги. Ці коливання генерують залежне від часу вертикальне прискорення цистерни, яке діє як додатковий механізм збудження для плескань рідини.

Вертикальне прискорення цистерни можна представити як:

$$a_z(t) = \ddot{z}_v(t),$$

де $z_v(t)$ – вертикальне переміщення центру мас транспортного засобу. Зауважимо, що реальний профіль дороги є складним і нерегулярним, містить багато нерівностей з різними масштабами. Але підвіска автомобіля та рідина в резервуарі реагують не на все, а переважно на періодичні нерівності з характерною довжиною хвилі L_r [6,9]. Такі нерівності виникають через технологію укладання асфальту, колійність, стики плит, повторювані дефекти покриття.

Тому переміщення профілю дороги вважається гармонічним: нерівності дороги моделюються як регулярний, періодичний вплив на транспортний засіб, а не як випадкові удари:

$$z_r(x) = h_r \cos\left(\frac{2\pi}{L_r} x\right),$$

та для транспортного засобу, який рухається із сталою швидкістю V , амплітуда результуючого горизонтального навантаження приймає форму:

$$a_x(t) = -h_r \cos\left(\frac{2\pi}{L_r} x\right) \cos(\Omega_r t), \quad \Omega_r = \frac{2\pi V}{L_r}.$$

Вертикальне прискорення входить до динамічної умови на вільній поверхні через складову $a_z(t)$ z .

Хоча ця складова зникає на рівноважній вільній поверхні $z=0$, вона змінює ефективне поле сили тяжіння, що діє на рідину. Введення ефективної сили тяжіння:

$$g_{\text{eff}}(t) = g + a_z(t),$$

веде до зміни граничної умови, вона набуває вигляду:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} + g_{\text{eff}}(t) \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0, \quad z = 0.$$

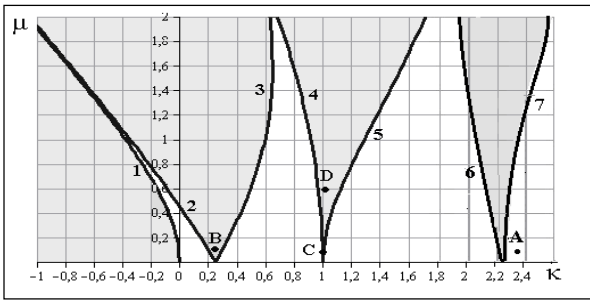
Така періодична модифікація ефективної сили тяжіння призводить до параметричного збудження мод плескання. Для кожної моди коливань (n,k) визначальне диференціальне рівняння приймає вигляд:

$$\ddot{q}_{nk} + \omega_{nk}^2 [1 + \varepsilon \cos(\Omega_r t)] q_{nk} = F_{nk}(t), \quad \varepsilon = \frac{a_{z0}}{g}, \quad (1)$$

тобто є неоднорідним рівнянням типу Матьє [25].

Зауважимо, що на відміну від рівняння (1) тут нам слід враховувати принаймні дві моди $n = 0$ та $n = 1$.

Зони стійкості та нестійкості руху рідини в резервуарі при вертикальних навантаженнях знаходяться за допомогою діаграми Айнса-Стретта, яка зображена на рисунку 1.



Рисунку 1 – Діаграма Айнса-Стретта

Тут введені спеціальні координати (κ, μ), які визначаються таким чином:

$$\kappa = \frac{\omega_{nk}^2}{\Omega_r^2}, \quad \mu = \frac{\varepsilon}{g}, \quad k = \overline{1, M}, \quad n = 0, 1.$$

Для кривих 1–5 на рисунку 1 в [26] отримані такі аналітичні вирази:

$$\begin{aligned} \mu_1(\kappa) &= 2 \sqrt{\frac{\kappa(\kappa - 1)(\kappa - 4)}{(3\kappa - 8)}}, \quad \kappa < 0, \\ \mu_2(\kappa) &= \frac{1}{4} \sqrt{(9 - 4\kappa)(13 - 29\kappa)} - (9 - 4\kappa), \quad 0 < \kappa < \frac{1}{4}, \\ \mu_3(\kappa) &= \frac{1}{4} (9 - 4\kappa \mp \sqrt{(9 - 4\kappa)(13 - 29\kappa)}), \quad \frac{1}{4} < \kappa < \frac{13}{20}, \\ \mu_4(\kappa) &= \sqrt{\frac{2(\kappa - 1)(\kappa - 4)(\kappa - 9)}{(\kappa - 5)}}, \quad \frac{1}{20} < \kappa < 1, \\ \mu_5(\kappa) &= 2 \sqrt{\kappa(\kappa - 1)(\kappa - 4)/(3\kappa - 8)}, \quad \kappa > 1. \end{aligned} \quad (1)$$

Криві 6–7 побудовані за методикою, запропонованою в [26]. Сірі зони на рисунку 2 відповідають зонам нестійкого руху, в той час, коли білі зони описують параметри вертикального навантаження, при яких рух рідини буде стійким.

За допомогою діаграми Айнса-Стретта можна за даними вертикального навантаження (амплітуда, частота), та визначивши спектр коливань вільної поверхні (значення ω_{nk}), з'ясувати чи є рух рідини (а за ним і транспортного засобу) стійким.

Далі вивчимо умови резонансу.

Параметричний резонанс виникає, коли частота збудження задовольняє умові [26]:

$$\Omega_r \approx \frac{2\omega_{nk}}{m}, \quad m = 1, 2, \dots \quad (3)$$

Зокрема, в формулі (3) $m = 1$ відповідає головному параметричному резонансу, (точка В на діаграмі Айнса-Стретта), $m = 2$ відповідає субгармонічному збудженню, (точка С на діаграмі Айнса-Стретта), $m = 3$ відповідає субгармонічному збудженню, (точка А на діаграмі Айнса-Стретта)

Цей механізм принципово відрізняється від прямого впливу, спричиненого поздовжнім прискоренням, і може призвести до нестійкості навіть за відсутності горизонтального руху.

Зауважимо, що при комбінованому збудженні мод $n = 0$ та $n = 1$, на відміну від горизонтального прискорення, вертикальне збудження не вводить куткової залежності, тому параметрично збуджує осесиметричні моди $n = 0$, крім того може нелінійно взаємодіяти безпосередньо модами $n = 1$, [6,9]. Це

пояснює експериментально спостережуване співіснування нахилу вільної поверхні (дипольної моди) та вертикальних коливань «дихання» стовпа рідини.

Рівняння (1) належать до класу неоднорідних рівнянь Мат'є-Хілла. Як показано у роботі [26], діаграма стійкості рівнянь Мат'є-Хілла не залежить від виду правої частини (неоднорідного члена). Тому діаграма стійкості, представлена на рисунку 1, залишається чинною.

Водночас реакція вільної поверхні рідини суттєво залежить також від наявності горизонтального збудження. Саме горизонтальні навантаження здатні спричинити резонансні явища. При чисто горизонтальному збудженні, коли частота зовнішнього впливу збігається з основною частотою коливань рідини (тобто за умов резонансу), амплітуда підйому вільної поверхні зростає лінійно за часом. У нелінійному наближенні цей ріст може стати навіть експоненціальним [6,9]. У випадку виключно горизонтального збудження жорстка оболонка з рідиною мас, як правило, лише один основний резонанс. Натомість за комбінованого вертикально-горизонтального збудження у системі з'являються додаткові резонансні частоти [6,9]. Якщо частота горизонтального збудження ω_h близька до основної частоти плескання ω_{n1} , або коли сума чи різниця частот горизонтального та вертикального збуджень ($\omega_h \pm \omega_n$) наближається до цієї основної частоти, також виникає резонанс, який є суб-резонансом.

Такий резонанс проявляється у лінійному зростанні амплітуди коливань висоти вільної поверхні з часом, навіть у тому випадку, коли параметри вертикального збудження знаходяться в області стійкості (білі ділянки на рисунку 1). Натомість, якщо параметри вертикального збудження потрапляють у нестійку область (сірі ділянки на діаграмі стійкості), висота підйому вільної поверхні зростає вже за експоненціальним законом.

Наведемо приклад. Розглянемо жорстку циліндричну оболонку, що містить рідину. Оболонка, що характеризується розмірами $R = 1$ м, $H = 1$ м, піддається комбінованому гармонічному збудженню:

$$a_x(t) = a_h \cos(\omega_h t), \quad a_z(t) = a_v \cos(\omega_v t),$$

Система «оболонка-рідина» на початку руху перебувала у стані спокою. Розрахунки руху вільної поверхні проводилися для різних значень параметрів збудження: амплітуд a_h, a_v та частот ω_h, ω_v . Спочатку розглядалися чисто вертикальні збудження, тобто припускалось, що $a_h = 0$. Фазові портрети руху в координатах $(\zeta, \dot{\zeta})$ показано на рисунку 2.

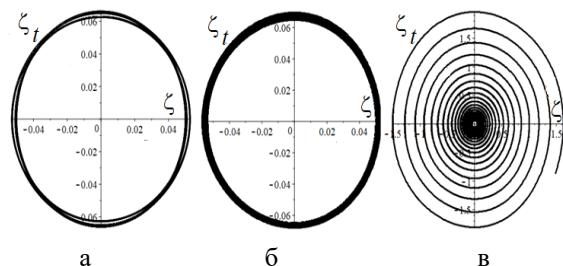


Рисунок 2 – Фазові портрети руху рідини під вертикальним навантаженням протягом 200 с

Рисунок 2 а) відповідає $a_h = 0$, $a_v = 1$, $\omega_v = 1$ Гц, тоді як рисунок 2 б) та 2 в) відповідають $a_h = 0$, $a_v = 1$, з $\omega_v = 0,65959$ Гц та $\omega_v = 1,31918$ Гц відповідно. Результати показують, що в перших двох випадках рухи є стабільними, тоді як для $\omega_v = 1,31918$ Гц амплітуда зростає без обмежень, що відповідає випадку параметричного резонансу (частота збудження дорівнює подвоєній основній частоті).

Далі розглядалися комбіновані вертикальні та горизонтальні збудження, тобто додавалося горизонтальне навантаження. В результаті розрахунків були отримані фазові портрети в координатах $(\zeta, \dot{\zeta})$, які показано на рисунку 3.

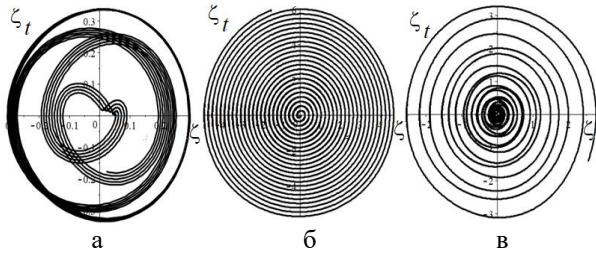


Рисунок 3 – Фазові портрети руху рідини під комбінованим навантаженням протягом 200 с

Були застосовані такі параметри комбінованого збудження: рисунок 3 а): $a_h = 0,1$, $a_v = 1$, $\omega_h = \omega_v = 1$ Гц; рисунок 3 б): $a_h = 0,1$, $a_v = 1$, $\omega_h = \omega_v = 0,65959$ Гц; рисунок 3 в): $a_h = 0,1$, $a_v = 1$, $\omega_h - \omega_v = 0,65959$ Гц.

Слід зазначити, що в цьому випадку спостерігається ще один резонанс, пов'язаний з горизонтальним збудженням $\omega_h = 0,65959$ Гц, а також суб-резонанс, пов'язаний з $\omega_h - \omega_v = 0,65959$ Гц.

Зауважимо також, що певні комбінації швидкості транспортного засобу V та довжини хвилі дороги L_r можуть призвести до параметричної нестабільності.

Посилення плескань може відбуватися навіть за невеликої нерівності дороги.

Вертикальне збудження може опосередковано посилювати плескання при врахуванні нелінійного модального зв'язку [7].

Таким чином, рух на хвилястій дорозі викликає параметричне збудження режимів плескання через модифікацію сили тяжіння.

Цей ефект необхідно враховувати під час оцінки безпеки перевезення автоцистерн, що містять небезпечні рідини.

Практичне значення: результати проведених досліджень можуть бути використані для вибору безпечної швидкості руху автоцистерни, для оцінювання небезпечних ділянок дороги і підбору безпечного маршруту автоцистерн, для обґрунтування потреби в демпфуючих пристроях, вживанні додаткових заходів із забезпечення екологічної безпеки зберігання та транспортування рідин, для попередження аварійних ситуацій під час перевезення небезпечних рідин.

Висновки

У роботі досліджено вплив вертикальних коливань, що виникають під час руху автоцистерни по хвилястому дорожньому покриттю, на динаміку рідини в резервуарі. Встановлено, що вертикальні прискорення транспортного засобу призводять до зміни ефективної сили тяжіння, що діє на рідину, внаслідок чого виникає параметричне збудження мод плескання вільної поверхні.

Показано, що динаміка коливань рідини може бути описана неоднорідними рівняннями Мат'є-Хілла, а аналіз стійкості руху здійснюється з використанням діаграми Айнса-Стретта. Визначено області стійкого та нестійкого руху рідини залежно від параметрів вертикального збудження та власних частот системи.

Встановлено, що параметричний резонанс виникає за певних співвідношень між частотою зовнішнього збудження та власною частотою коливань рідини. Розглянуто головний параметричний резонанс та субгармонічні режими збудження. Показано, що вертикальне збудження здатне спричинити втрату стійкості навіть за відсутності горизонтального руху.

Аналіз комбінованого вертикально-горизонтального збудження показав наявність додаткових резонансних і субрезонансних режимів, що виникають внаслідок взаємодії вертикальних і горизонтальних коливань. Встановлено, що при збігу частоти горизонтального збудження з основною частотою плескання рідини, а також при наближенні суми або різниці частот вертикального та горизонтального збуджень до власної частоти системи виникають резонансні явища, що супроводжуються зростанням амплітуди коливань вільної поверхні.

Встановлено, що певні поєднання швидкості руху транспортного засобу та довжини хвилі дорожніх нерівностей можуть призводити до параметричної нестійкості руху рідини навіть за умови незначних нерівностей дорожнього покриття. Вертикальне збудження також може посилювати плескання рідини за наявності нелінійного модального зв'язку.

Таким чином, рух автоцистерни по хвилястій дорозі викликає параметричне збудження режимів плескання рідини внаслідок зміни ефективного гравітаційного поля. Отримані результати свідчать про необхідність врахування даного ефекту при оцінці безпеки експлуатації автоцистерн та перевезення небезпечних рідин для забезпечення екологічної безпеки зберігання та транспортування таких рідин.

Отримані результати можуть бути використані для попередньої оцінки небезпечних режимів руху автоцистерн, визначення критичних поєднань швидкості руху та довжини хвилі дорожніх нерівностей, а також для обґрунтування конструктивних або організаційних заходів зменшення ризику плескання небезпечних рідин.

ЛІТЕРАТУРА

1. Sierikova O., Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitchko V. Reducing environmental hazards of prismatic storage tanks under vibrations. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*. 2022. Vol. 21. P. 249–257. DOI: <https://doi.org/10.37394/23201.2022.21.27>.
2. Holota V. Ensuring conditions for environmentally safe petroleum products transportation in tanks. *Scientific and Practical Journal "Environmental Sciences"*. 2025. № 1(58). P. 240–245. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.39>.

3. Tran V. N., Nguyen X. N., Vu V. T., Dang T. P. Rollover stability analysis of liquid tank truck taking into account the road profiles. *Journal of Applied Engineering Science*. 2022. Vol. 20. № 4. P. 1133–1142. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes0-36578>.
4. Vern S., Shrimali M. K., Bharti S. D., Datta T. K. Behavior of liquid storage tank under multidirectional excitation. *Advanced Structural Technologies. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 81. P. 151–160. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-5235-9_16.
5. Vern S., Shrimali M. K., Bharti S. D., Datta T. K. Seismic behavior of baffled liquid storage tank under far-field and near-field earthquake. *Recent Advances in Computational Mechanics and Simulations. Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 103. P. 407–418. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-8138-0_34.
6. Sierikova O. *The Fundamentals of Boundary Element Methods*. Nova Science Publishers, Inc., New York, 2024. 150 p. DOI: <https://doi.org/10.52305/KFFP5657>.
7. Degtyariv K., Kriutchenko D., Osypov I., Sierikova O., Strelnikova E. Dampers influence on sloshing mitigation in fuel tanks of launch vehicles and reservoirs. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2024. P. 420–430. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61415-6_36.
8. Chen Y., Deng Z., Wang Y. Free liquid surface sloshing in a tank of a moving vehicle and its suppression. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. 2020. Vol. 8. № 2. P. 147–163. DOI: <https://doi.org/10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2020034199>.
9. Strelnikova E., Kriutchenko D., Gnitko V., Degtyarev K. Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 2020. Vol. 111. P. 78–87. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2019.10.008>.
10. Choudhary N., Gnitko V., Kolodiaznyy A., Kriutchenko D., Strelnikova E. Sloshing dynamics and stability of fuel tanks under short-duration high-intensity loads. *Lecture Notes in Mechanical Engineering. CAMPE 2025*. 2026. P. 200–210. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-032-16381-3_19.
11. Choudhary N., Kumar N., Strelnikova E., Gnitko V., Kriutchenko D., Degtyariv K. Liquid vibrations in cylindrical tanks with flexible membranes. *Journal of King Saud University – Science*. 2021. Vol. 33. № 8. Article 101589. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101589>.
12. Choudhary N., Bora S. N., Strelnikova E. Study on liquid sloshing in an annular rigid circular cylindrical tank with damping device placed in liquid domain. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2021. Vol. 9. P. 1577–1589. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42417-021-00314-w>.
13. Ibrahim R. A., Pilipchuk V. N., Ikeda T. Recent advances in liquid sloshing dynamics. *Applied Mechanics Reviews*. 2001. Vol. 54. № 2. P. 133–199. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3097293>.
14. Raynovskyy A., Timokha A. N. *Sloshing in Upright Circular Containers: Theory, Analytical Solutions, and Applications*. CRC Press/Taylor & Francis Group, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780429356711>.
15. Savchenko I., Kozzechko V., Shapoval A. Method for accelerating diffusion processes when boring structural steels. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2022. P. 793–800. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_94.
16. Lee C. B., Lee J. H. Nonlinear dynamic response of a concrete rectangular liquid storage tank on rigid soil subjected to three-directional ground motion. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11. № 10. Article 4688. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11104688>.
17. Sierikova O., Kolosov V., Degtyarev K., Strelnikova E. Improving the mechanical properties of liquid hydrocarbon storage tank materials. *Materials Science Forum*. 2022. Vol. 1068. P. 223–229. DOI: <https://doi.org/10.4028/p-888232>.
18. Sierikova O., Strelnikova E., Gnitko V., Tonkonozhenko A., Pisia L. Nanocomposites implementation for oil storage systems electrostatic protection. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 367. P. 573–585. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_49.
19. Sierikova O., Strelnikova E., Kriutchenko D. Membrane installation in storage tanks for seismic loads impact protection. *Acta Periodica Technologica*. 2023. Vol. 54. P. 209–222. DOI: <https://doi.org/10.2298/APT2354209S>.
20. Fatahi M., Meftah M., Mehran H., Tehrani S. Investigation of nonlinear behaviour of semiburied cylindrical concrete reservoir without dynamic load effect. *Shock and Vibration*. 2021. Vol. 2021. Article 6682297. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6682297>.
21. Pallas Enguita S., Chen C.-H., Kovacic S. A review of emerging sensor technologies for tank inspection: a focus on LiDAR and hyperspectral imaging and their automation and deployment. *Electronics*. 2024. Vol. 13. № 23. Article 4850. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics13234850>.
22. Stoicescu A.-A., Ripeanu R. G., Tănase M., Ilinică C. N., Toader L. Multifactorial analysis of defects in oil storage tanks: implications for structural performance and safety. *Processes*. 2025. Vol. 13. № 8. Article 2575. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13082575>.
23. Dvorak Z., Leitner B., Ballay M., Mocova L., Fuchs P. Environmental impact modeling for transportation of hazardous liquids. *Sustainability*. 2021. Vol. 13. № 20. Article 11367. DOI: <https://doi.org/10.3390/su132011367>.
24. Iatsyshyn A. V., Markina L. M., Tiutiunyk O. O., Tiutiunyk V. V., Shukurlyu E. Development of mathematical decision-making support tools for effective response to emergencies during the transportation of dangerous substances by road transport. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. Article 012110. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012110>.
25. Kolukula S. S., Chellapandi P. Dynamic stability of plane free surface of liquid in axisymmetric tanks. *Advances in Acoustics and Vibration*. 2013. Vol. 2013. Article ID 298458. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/298458>.
26. Butikov E. Analytical expressions for stability regions in the Ince–Strutt diagram of Mathieu equation. *American Journal of Physics*. 2018. Vol. 86. P. 257–267. DOI: <https://doi.org/10.1119/1.5021895>.

UDC 504.5

CONSIDERING ROAD SURFACE UNEVENNESSES ON TRANSPORTING HAZARDOUS LIQUIDS

V. Holota

Adjunct

ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-7461-4376>

National University of Civil Protection of Ukraine

8 Onopriienka St., Cherkasy, 18034, Ukraine

DOI: <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2026.1.5>

Received: May 1, 2026

Accepted: May 29, 2026

Published: May 31, 2026

Cite as: Holota, V. (2026). Considering road surface unevennesses on transporting hazardous liquids. *Technogenic and Ecological Safety*, 19(1/2026), 39–44. <https://doi.org/10.52363/2522-1892.2026.1.5>

Open Access License: Creative Commons Attribution 4.0 International License

Abstract. Paper treats the influence of vertical vibrations that occur in a tanker truck moving on a wavy or uneven road surface on the dynamics of the fluid inside the tank. It has been shown the interaction of the vehicle wheels with the road profile causes vertical accelerations that change the effective field of gravity and act as an additional mechanism for exciting vibrations of the free surface of the liquid.

The purpose of the paper is to develop a mathematical model of the transporting hazardous liquids process, which takes into account the unevenness of the road surface to minimize the negative impact of liquids to the environment.

Novelty: approaches to determine the effects of the road surface condition on the safety of storing and transporting hazardous liquids in tanks have been further developed.

The practical significance of the results obtained is in using the developed mathematical model to assess safe modes of tanker truck movement, identify dangerous sections of the road and establish safe transportation routes and reduce the risk of emergency situations during the transportation of hazardous liquids.

The results of calculations of the liquid movement in a rigid cylindrical shell at different amplitudes and frequencies of external influence have been presented, and the phase portraits of the movement of the free surface have been analyzed. It is established that certain combinations of the speed of the vehicle and the characteristics of road irregularities could cause increased sloshing even with insignificant unevenness of the surface.

The conclusion is in the necessity to take into account the influence of vertical and combined vibrations when assessing the safety of tank trucks and the transportation of dangerous liquids. This also supports safer route choices.

Key words: tank truck, liquid sloshing, environmental safety, environment, dangerous impact of liquid, dangerous liquids transportation.

REFERENCES

1. Sierikova, O., Strelnikova, E., Kriutchenko, D., & Gnitko, V. (2022). Reducing environmental hazards of prismatic storage tanks under vibrations. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 21, 249–257. <https://doi.org/10.37394/23201.2022.21.27>.
2. Holota, V. (2025). Ensuring conditions for environmentally safe petroleum products transportation in tanks. *Scientific and Practical Journal "Environmental Sciences"*, 1(58), 240–245. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2025.eco.1-58.39>.
3. Tran, V. N., Nguyen, X. N., Vu, V. T., & Dang, T. P. (2022). Rollover stability analysis of liquid tank truck taking into account the road profiles. *Journal of Applied Engineering Science*, 20(4), 1133–1142. <https://doi.org/10.5937/jaes0-36578>.
4. Vern, S., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T. K. (2021). Behavior of liquid storage tank under multidirectional excitation. *Advanced Structural Technologies. Lecture Notes in Civil Engineering*, 81, 151–160. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5235-9_16.
5. Vern, S., Shrimali, M. K., Bharti, S. D., & Datta, T. K. (2021). Seismic behavior of baffled liquid storage tank under far-field and near-field earthquake. *Recent Advances in Computational Mechanics and Simulations. Lecture Notes in Civil Engineering*, 103, 407–418. https://doi.org/10.1007/978-981-15-8138-0_34.
6. Sierikova, O. (2024). *The Fundamentals of Boundary Element Methods*. Nova Science Publishers, Inc. <https://doi.org/10.52305/KFFP5657>.
7. Degtyariv, K., Kriutchenko, D., Osypov, I., Sierikova, O., & Strelnikova, E. (2024). Dampers influence on sloshing mitigation in fuel tanks of launch vehicles and reservoirs. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2023. Lecture Notes in Networks and Systems*, 420–430. https://doi.org/10.1007/978-3-031-61415-6_36.
8. Chen, Y., Deng, Z., & Wang, Y. (2020). Free liquid surface sloshing in a tank of a moving vehicle and its suppression. *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*, 8(2), 147–163. <https://doi.org/10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2020034199>.
9. Strelnikova, E., Kriutchenko, D., Gnitko, V., & Degtyarev, K. (2020). Boundary element method in nonlinear sloshing analysis for shells of revolution under longitudinal excitations. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 111, 78–87. <https://doi.org/10.1016/jenganbound.2019.10.008>.
10. Choudhary, N., Gnitko, V., Kolodiazhnyi, A., Kriutchenko, D., & Strelnikova, E. (2026). Sloshing dynamics and stability of fuel tanks under short-duration high-intensity loads. *Lecture Notes in Mechanical Engineering. CAMPE 2025*, 200–210. https://doi.org/10.1007/978-3-032-16381-3_19.
11. Choudhary, N., Kumar, N., Strelnikova, E., Gnitko, V., Kriutchenko, D., & Degtyariv, K. (2021). Liquid vibrations in cylindrical tanks with flexible membranes. *Journal of King Saud University – Science*, 33(8), Article 101589. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2021.101589>.
12. Choudhary, N., Bora, S. N., & Strelnikova, E. (2021). Study on liquid sloshing in an annular rigid circular cylindrical tank with damping device placed in liquid domain. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 9, 1577–1589. <https://doi.org/10.1007/s42417-021-00314-w>.
13. Ibrahim, R. A., Pilipchuk, V. N., & Ikeda, T. (2001). Recent advances in liquid sloshing dynamics. *Applied Mechanics Reviews*, 54(2), 133–199. <https://doi.org/10.1115/1.3097293>.
14. Raynovskyy, A., & Timokha, A. N. (2020). *Sloshing in Upright Circular Containers: Theory, Analytical Solutions, and Applications*. CRC Press/Taylor & Francis Group. <https://doi.org/10.1201/9780429356711>.
15. Savchenko, I., Kozechko, V., & Shapoval, A. (2022). Method for accelerating diffusion processes when boring structural steels. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 793–800. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85230-6_94.
16. Lee, C. B., & Lee, J. H. (2021). Nonlinear dynamic response of a concrete rectangular liquid storage tank on rigid soil subjected to three-directional ground motion. *Applied Sciences*, 11(10), Article 4688. <https://doi.org/10.3390/app11104688>.
17. Sierikova, O., Koloskov, V., Degtyarev, K., & Strelnikova, E. (2022). Improving the mechanical properties of liquid hydrocarbon storage tank materials. *Materials Science Forum*, 1068, 223–229. <https://doi.org/10.4028/p-888232>.
18. Sierikova, O., Strelnikova, E., Gnitko, V., Tonkonozhenko, A., & Pisia, L. (2022). Nanocomposites implementation for oil storage systems electrostatic protection. *Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering – 2021. Lecture Notes in Networks and Systems*, 367, 573–585. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_49.
19. Sierikova, O., Strelnikova, E., & Kriutchenko, D. (2023). Membrane installation in storage tanks for seismic loads impact protection. *Acta Periodica Technologica*, 54, 209–222. <https://doi.org/10.2298/APT2354209S>.
20. Fatahi, M., Meftah, M., Mehran, H., & Tehrani, S. (2021). Investigation of nonlinear behaviour of semiburied cylindrical concrete reservoir without dynamic load effect. *Shock and Vibration*, 2021, Article 6682297. <https://doi.org/10.1155/2021/6682297>.
21. Pallas Enguita, S., Chen, C.-H., & Kovacic, S. (2024). A review of emerging sensor technologies for tank inspection: A focus on LiDAR and hyperspectral imaging and their automation and deployment. *Electronics*, 13(23), Article 4850. <https://doi.org/10.3390/electronics13234850>.
22. Stoicescu, A.-A., Ripeanu, R. G., Tănase, M., Ilincă, C. N., & Toader, L. (2025). Multifactorial analysis of defects in oil storage tanks: Implications for structural performance and safety. *Processes*, 13(8), Article 2575. <https://doi.org/10.3390/pr13082575>.
23. Dvorak, Z., Leitner, B., Ballay, M., Mocova, L., & Fuchs, P. (2021). Environmental impact modeling for transportation of hazardous liquids. *Sustainability*, 13(20), Article 11367. <https://doi.org/10.3390/su132011367>.
24. Iatsyshyn, A. V., Markina, L. M., Tiutiunyk, O. O., Tiutiunyk, V. V., & Shukurlu, E. (2023). Development of mathematical decision-making support tools for effective response to emergencies during the transportation of dangerous substances by road transport. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254, Article 012110. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012110>.
25. Kolukula, S. S., & Chellapandi, P. (2013). Dynamic stability of plane free surface of liquid in axisymmetric tanks. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2013, Article ID 298458. <https://doi.org/10.1155/2013/298458>.
26. Butikov, E. (2018). Analytical expressions for stability regions in the Ince–Strutt diagram of Mathieu equation. *American Journal of Physics*, 86, 257–267. <https://doi.org/10.1119/1.5021895>.