

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ АВТОМОБІЛЬНИХ ЦИСТЕРН

<https://doi.org/10.23939/istcipa2023.58.005>

© Войтик Я. М., 2024

Постановка проблеми та мета роботи. Застосування цистерн особливо з напівпричепами для вантажних перевезень забезпечує транспортування наливних вантажів. Це дозволяє значно покращити вантажопідйомність автоцистерни і знизити витрати. Є багато модифікацій автомобільних цистерн, призначених для перевезення різних видів вантажів: продуктів харчування, хімікатів, світлих і темних нафтопродуктів. Незважаючи на вищу вартість перевезення порівняно з вантажівками, автоцистерни застосовують все частіше. При цьому немає необхідності в додатковій тарі та витратах на пакування, забезпечується високий рівень збереження вантажу під час завантаження, транспортування та розвантаження, зменшуються пов'язані з цими операціями. Тому актуальним є дослідження експлуатаційних властивостей автоцистерн, розробка відповідних конструктивних рішень, що дозволить збільшити їх експлуатаційну й економічну ефективність.

Методика роботи. Проведено огляд літературних джерел досліджень, який стосувався досліджень, пов'язаних з розвитком конструкції, досліджень і нормативних документів. Аналіз проводили для хімічних, харчових автоцистерн, бензовозів, бітумовозів, газовозів. Розглядали конструкції та характеристики автоцистерн для стандартних умов експлуатації, ізотермічні автоцистерни, автоцистерни для перевезення небезпечних вантажів. **Результати статті.** На основі проведеного огляду літературних джерел можна зробити висновок, що вузькоспеціалізовані математичні моделі не завжди з необхідною точністю описують реальні фізичні процеси, що відбуваються при експлуатації автоцистерн, зокрема, для наближених до явища гідроудару і рух на поворотах. Актуальними є такі дослідження для конструкцій напівпричепів автоцистерн безрамного типу. **Наукова новизна.** У статті проведено огляд літературних джерел, що стосується конструкції, проблем експлуатації, також ДСТів, наведено математичні залежності між основними параметрами автоцистерн. **Практичне значення результатів.** Проведений огляд та аналіз дозволяє визначити напрямки подальших досліджень і їх важливість. **Напрями подальших досліджень за тематикою статті.** У подальших дослідженнях необхідно розрахувати поздовжню стійкість автоцистерни; створити математичну модель відповідної складності, здатної описати рух автоцистерни, при якому можливе виникнення явища гідравлічного удару; дослідити різке гальмування автоцистерни: отримати залежності зусиль у СЗП і тисків на днища від часу, швидкості гальмування з врахуванням зміни рівня заповнення котла.

Ключові слова: автомобільні цистерни, експлуатаційні властивості, напівпричепа, конструкції, дослідження динаміки, явище гідравлічного удару, стандарти.

Вступ. Постановка проблеми

Застосування цистерн для вантажних перевезень забезпечує транспортування наливних вантажів. Але існують особливості при перевезенні таких вантажів, зокрема, якщо вони відносяться до однієї і тієї ж категорії, вимагають застосування різних і спеціально пристосованих автоцистерн. При перевезенні, наприклад, бензину, сирої нафти, інших нафтопродуктів, використовують різні автоцистерни, оскільки є правило про сумісність таких вантажів. Це ж стосується і рідких продуктів харчування.

Застосування автоцистерн, особливо з напівпричепами, може значно покращити вантажопідйомність автоцистерни і знизити витрати. Існує багато модифікацій автомобільних цистерн, призначених для перевезення різних видів вантажів: продуктів харчування, хімікатів, світлих і темних нафтопродуктів. Незважаючи на вищу вартість перевезення порівняно із вантажівками, автоцистерни застосовують все частіше. При цьому немає необхідності в додатковій тарі та витратах на пакування, забезпечується високий рівень збереження вантажу під час завантаження,

транспортування та розвантаження. Тому актуальним є дослідження їхніх експлуатаційних властивостей, розробка відповідних конструктивних рішень, що дозволить збільшити їхню експлуатаційну й економічну ефективність.

Огляд інформаційних джерел

Проведено огляд літературних джерел досліджень в Україні і за кордоном. Огляд стосувався досліджень, пов'язаних з розвитком конструкції, досліджень і нормативних документів.

Аналіз проводили для хімічних, харчових автоцистерн, бензовозів, бітумовозів, газовозів. Розглядали конструкції та характеристики автоцистерн для стандартних умов експлуатації, ізотермічні автоцистерни, автоцистерни для перевезення небезпечних вантажів. При створенні нових конструкцій автоцистерн багато досліджень присвячено працездатності елементів їх конструкції [1–6], оцінці втоми та надійності несівних елементів їхніх конструкцій [7, 8].

Дослідження можна розділити на два напрямки.

До першого напрямку відносяться дослідження динаміки автомобілів (ТЗ) на спрощених моделях [9–15]. До другого – дослідження з моделювання структурних елементів ТЗ. У роботі [16] наведено аналіз надійності ТЗ, у яких модель описано як зосереджені маси, пов'язані жорсткостями. Навантаження представлено спектральною щільністю вертикальної нерівності [17, 18] або процес розкладається на кілька стаціонарних підпроцесів [19]. Вихідними даними є експериментальні дослідження. У роботах [20–22] наведено аналіз міцності та надійності за різними критеріями: перекидання і занос транспортного засобу. Розглянуто автоцистерну із частковим заповненням рідиною. Збурення задається як вектор випадкових параметрів. У роботі у процесі аналізу недостатньо були розглянуті випадкові впливи дорожнього покриття, не досліджені внутрішні деформації та напруження.

Розглянуті в роботах математичні моделі мають вузьку спеціалізацію, результати можуть використовуватися лише для конкретних типів та моделей автоцистерн.

Для безпечної роботи автоцистерн доцільно враховувати явище гідравлічного удару. Під гідроударом розуміють явище швидкої зміни тиску в рідині, спричинене швидкою зміною швидкості її течії в напірному трубопроводі [23–25].

Явище гідроудару досліджували в різних галузях науки і техніки [26–28]. Для моделювання коливань рідини в котлі автоцистерни використовують механічний аналог рідини, його параметри розраховують з урахуванням можливої появи гідроудару в перехідних режимів руху автоцистерни [29]. Теоретичні основи спрощеного розрахунку гідравлічного удару в залізничній цистерні наведено в роботі [30]. Автори стверджують, що тиску гідроудару відповідає квазістатичний стан рідини, передування процесу її плескання, який описують диференціальним рівнянням рівноваги рідини у випадку її переносного руху. У [31] розглянуто процес поширення хвиль гідравлічного удару для повністю заповненої цистерни з використанням одновимірної моделі течії. Отримано закон зміни тиску рідини в циліндричній цистерні, пов'язаний із законом зміни швидкості транспортного засобу.

У більшості досліджень приділено недостатню увагу питанням адекватного опису зовнішнього навантаження. Воно задається або у вигляді шуму, або детермінованим, не враховуючи багатівісних колісних автоцистерн, що мають залежний вплив на осі. Для детермінованого навантаження це відповідає зміні фази, а у разі застосування моделі випадкового навантаження необхідно враховувати наявність взаємної кореляції між компонентами вектора навантаження. Явища гідроудару зазвичай розглядають у вузькій постановці.

Для безпечного використання автоцистерн важливою є нормативна документація, пов'язана з безпечною експлуатацією.

В Україні є низка ДСТів, які регламентують контроль і правила експлуатації, зокрема і процеси перевезення [32–45].

Документами, що встановлюють обов'язкові вимоги з урахуванням величини ризику задіяння шкоди, є технічні регламенти. Технічні регламенти розробляють і приймають з метою захисту

життя або здоров'я громадян, майна фізичних або юридичних осіб, державного або муніципального майна, охорони довкілля, життя або здоров'я тварин і рослин, тобто в нашому випадку з метою дотримання безпеки перевезень.

Основою для розробки проекту спеціального технічного регламенту, що встановлює вимоги безпеки при перевезеннях небезпечних вантажів, є додатки А і В до Європейської угоди про міжнародне дорожнє перевезення небезпечних вантажів (ДОПОГ або ADR), версія 2016 року. Додатки А і В до ДОПОГ (версія 2016 р.) є досить компактним документом, що відноситься не лише до транспортних засобів для перевезення зріджених вуглеводневих газів, але регламентує інші питання, що стосуються безпеки перевезень небезпечних вантажів усіх класів, а не тільки небезпечних вантажів класу 2 (зріджених вуглеводневих газів). При цьому вимоги до конструкції базових транспортних засобів представлені окремим розділом і відповідають Правилам ЄЕК ООН № 105.

Автоцистерни розраховують:

- на міцність котла цистерни від дії надлишкового внутрішнього тиску газу при розрахунковій температурі стінки $+50^{\circ}\text{C}$, з урахуванням запобіжного пристрою;
- на міцність несівних конструкцій (котла автомобільної цистерни безрамної конструкції, рами, опор) з урахуванням коефіцієнта динамічності $K_d = w_{2,5}$, який враховує ударне навантаження автоцистерни при русі по нерівній дорозі;
- на стійкість циліндричної форми котла від спільної дії вакууму і максимальних згинальних навантажень;
- на розподіл маси автомобільної цистерни в спорядженому стані і з повною масою по осях і сторонах базового автомобіля;
- на поперечну і подовжню стійкість проти перекидання.

Цистерни для перевезення зріджених вуглеводневих газів, відповідно до Правил і безпечної експлуатації котла, що працює під тиском, розраховують на тиск, що виникає в них при температурі $+50^{\circ}\text{C}$, з урахуванням напружень, пов'язаних з динамічним навантаженням при русі.

Мета та завдання роботи

Метою є визначення тенденцій розвитку конструкцій автомобільних цистерн, проблемних питань, які потребують досліджень, і стану їх вирішення.

Виклад основного матеріалу

Згідно з Додатком А до ДОПОГ автоцистерни для перевезення зріджених вуглеводневих газів і їх кріплення при максимально допустимому завантаженні повинні витримувати навантаження, рівні:

- у напрямі руху – подвійній повній масі;
- до напрямку руху горизонтально під прямим кутом – повній масі;
- знизу вгору вертикально – повній масі;
- зверху вниз вертикально – подвійній повній масі.

У тому випадку несівної цистерни для зріджених вуглеводневих газів розраховується напруження σ в найбільш напруженій точці автоцистерни.

Розрахунок на міцність автоцистерн для перевезення зріджених газів, відповідно до Додатка А до ДОПОГ, здійснюється визначенням мінімальної товщини стінок:

$$e = 1,25 - \frac{P_{\text{вик}} D}{2\sigma\gamma},$$

де e – мінімальна товщина стінок цистерни в мм; $P_{\text{вик}}$ – тестувальний тиск в МПа; D – внутрішній діаметр корпусу цистерни в мм; σ – допустиме напруження в Н/мм^2 ; γ – коефіцієнт, що враховує можливе зменшення міцності завдяки зварним швам і не перевищує одиниці.

Проте товщина стінок автоцистерн циліндричної форми діаметром не більше 1,8 м повинна бути менше 5 мм, якщо діаметр більше 1,8 м, то мінімальну товщину стінки збільшують до 6 мм. Стійкість цистерн, відповідно до Додатка В до ДОПОГ, визначається співвідношеннями:

- відстань між зовнішніми точками контакту з ґрунтом правої і лівої шин однієї осі має становити не менше 90 % висоти центру ваги цистерни повної маси;
- навантаження на вісь (візок) напівпричепа повинно бути не більше 60 % від повної маси автопотяга.

Відповідно до стандартів кожен котел автоцистерни повинен містити на днищі круглий отвір діаметром не менше 500 мм. Правила будови і безпечної експлуатації котлів, що працюють під тиском, передбачають люки овальної форми розміром не менше 400 x 450 мм або люк круглої форми діаметром не менше 450 мм. Додаток А до ДОПОГ не обмежує ні форму, ні розміри люка для проведення внутрішнього огляду танка.

Цистерни повинні обладнуватися пристроями для гасіння гідравлічних ударів (хвилезаспокоювачами). Кількість і розташування хвилезаспокоювачів повинні забезпечувати розділення котла на відсіки місткістю не більше 4 м³ кожен і не повинні перешкоджати внутрішньому огляду котла. Мінімальна площа хвилезаспокоювача повинна становити не менше 75 % від площі поперечного перерізу автоцистерни. Кожна автоцистерна повинна мати не менше двох хвилезаспокоювачів. Додаток А до ДОПОГ передбачає, що автоцистерна повинна бути розділена перегородками або хвилезаспокоювачами на відсіки місткістю не більше 7,5 м³ (7500 л) або відстань між двома суміжними хвилезаспокоювачами має становити не більше 1,75 м. При цьому його площа повинна становити не менше 70 % площі поперечного перерізу автоцистерни. При дотриманні цих вимог Додатка А до ДОПОГ захист цистерни від пошкоджень, що спричиняються боковим ударом, вважається забезпеченим.

Мінімальний тестувальний тиск визначається відповідно до Додатка А до ДОПОГ. Гідравлічне тестування зварних автоцистерн, відповідно до Правил будови і безпечної експлуатації котлів, що працюють під тиском, повинне проводитися пробним (випробувальним) тиском P_{np} :

$$P_{np} = 1,25 - \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_e},$$

де P_{np} – розрахунковий тиск, МПа (кгс/см²); $[\sigma]_{20}$, $[\sigma]_e$ – допустиме напруження для матеріалу автоцистерни або її елементів відповідно при 20°C і розрахункової температури, МПа (кгс/см²).

Відношення $\frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]_e}$ приймається на основі матеріалу елементів (днищ, обичайок, кріплення, фланців та ін.) автоцистерни, для якого воно є найменшим.

Цистерни з нижнім наповненням та опорожненням повинні містити три затвори. Кожен затвор для наповнення або спорожнення цистерн для перевезення зріджених газів, відповідно до Додатка А до ДОПОГ, повинен обладнуватися щонайменше двома послідовно розташованими і незалежними один від одного замочними пристроями, що містять:

- затвор, тобто внутрішній замочний пристрій, змонтований усередині корпусу або на привареному фланці, або на його контрфланці;
- зовнішній замочний вентиль, встановлений на кінці кожного патрубку;
- затвор на кінці кожного патрубку, заглушку, різьбову пробку або еквівалентний пристрій.

Для автоцистерн характерні такі тенденції: вдосконалення конструкції, зниження власної маси (застосування легких сплавів, пластмас і несівних конструкцій причіпного складу), збільшення місткості, а також підвищення продуктивності обладнання для наповнення та розвантаження автоцистерн.

Напрямки, з яких проводять дослідження експлуатаційних властивостей автомобільних цистерн:

1. Конструктивні особливості:

- матеріали: вибір матеріалів, з яких виготовлені цистерни, впливає на їхню міцність, корозійностійкість і вагу;

- дизайн: аеродинаміка, форма і розміри цистерн можуть впливати на паливну ефективність і стабільність на дорозі;

2. Технічні характеристики:

- обсяг: максимальний обсяг перевезення впливає на економічність і рентабельність перевезень;

- вантажопідйомність: співвідношення ваги цистерни до вантажу важливе для розрахунку максимально допустимої ваги;

3. Експлуатаційні характеристики:

- паливна ефективність: вплив ваги цистерни та її заповненості на витрату пального;

- стійкість на дорозі: вплив конструкції цистерни на маневреність та поведінку автомобіля на різних типах покриттів;

4. Безпека:

- системи захисту: наявність систем, що запобігають витоку, а також системи стабілізації та гальмування;

- випробування: дослідження, які підтверджують відповідність цистерн вимогам безпеки;

5. Обслуговування та технічний контроль:

- регулярність обслуговування: вплив на довговічність цистерн;

- моніторинг стану: використання сучасних технологій для контролю стану цистерн у процесі експлуатації;

6. Екологічні аспекти:

- викиди: аналіз впливу на навколишнє середовище, включаючи викиди CO₂;

- утилізація: оцінка можливостей утилізації цистерн після завершення терміну експлуатації;

7. Економічні фактори:

- витрати на експлуатацію: аналіз витрат на паливо, обслуговування та ремонти;

- рентабельність: оцінка ефективності інвестицій в автомобільні цистерни.

Наукові дослідження, що стосуються вантажопідйомності автомобільних цистерн, охоплюють різні аспекти, включаючи технічні, економічні та екологічні фактори.

Ось кілька ключових напрямків досліджень:

1. Аналіз конструкційних особливостей:

- вага цистерни: дослідження, які оцінюють вплив ваги цистерни на вантажопідйомність, зокрема, різницю між алюмінієвими та сталевими конструкціями;

- форма і об'єм: вивчення впливу геометричних параметрів цистерни на ефективність перевезення та максимальну вантажопідйомність;

2. Дослідження навантаження та стійкості:

- розподіл навантаження: вивчення, як різні способи завантаження рідини впливають на стабільність транспортного засобу;

- динамічні навантаження: аналіз впливу динамічних навантажень під час руху на вантажопідйомність та знос конструкції;

3. Випробування на міцність:

- стрес-тести: проведення випробувань для визначення меж міцності цистерн під час максимального навантаження;

- вплив умов експлуатації: дослідження, як температурні коливання, вологість та інші умови впливають на вантажопідйомність;

4. Економічні дослідження:

- витрати на перевезення: аналіз впливу вантажопідйомності на економіку перевезень, включаючи витрати на паливо та обслуговування;

– оптимізація маршрутів: дослідження, що вивчають, як максимальна вантажопідйомність впливає на вибір найбільш ефективних маршрутів;

5. Екологічні дослідження:

– викиди CO₂: вивчення кореляції між вантажопідйомністю та викидами парникових газів;
– вплив на навколишнє середовище: аналіз, як оптимізація вантажопідйомності може зменшити негативний вплив на природу.

Наукові дослідження, що стосуються механічних властивостей автомобільних цистерн, охоплюють такі фактори:

1. Вибір матеріалів:

– сталь порівняно з алюмінієм: порівняння механічних властивостей сталевих і алюмінієвих цистерн, включаючи їхню міцність, корозійностійкість та вагу;
– композитні матеріали: дослідження нових матеріалів, таких як композити, які можуть зменшити вагу цистерн без втрати міцності;

2. Механічні властивості:

– міцність на розрив і зсув: тестування на розрив і зсув для визначення максимальних навантажень, які можуть витримувати матеріали;
– пластичність: оцінка, як матеріали ведуть себе під тривалими навантаженнями, їхня здатність до деформації без руйнування;

3. Витривалість до корозії:

– корозійні випробування: оцінка, як різні матеріали реагують на агресивні середовища, такі як хімічні речовини, які перевозяться;
– захисні покриття: використання спеціальних покриттів для покращення корозійностійкості;

4. Вплив температури:

– тестування при різних температурах: вивчення, як зміни температури впливають на механічні властивості матеріалів, особливо за екстремальних умов;

5. Процеси виготовлення:

– методи зварювання та обробки: дослідження, як різні технології виготовлення впливають на кінцеві механічні властивості цистерн;
– контроль якості: важливість контролю якості під час виробництва для забезпечення надійності та безпеки;

6. Моделювання та симуляція:

– комп'ютерне моделювання: використання чисельних методів для прогнозування поведінки матеріалів під навантаженням;
– кінцево-елементний аналіз: дослідження розподілу напружень та деформацій у матеріалах цистерн.

Моделювання та симуляція в дослідженнях автомобільних цистерн є важливими інструментами для аналізу їхньої поведінки за різних умов експлуатації:

1. Чисельні методи:

– метод скінченних елементів (FEM): один з найпоширеніших методів для моделювання механічних властивостей. Цей підхід дозволяє розбити складні конструкції на менші, простіші елементи, що спрощує розрахунок напружень, деформацій та інших механічних характеристик;
– метод кінцевих різниць (FDM): використовують для вирішення диференціальних рівнянь у задачах механіки. Підходить для моделювання динаміки рідин у цистернах;

2. Динамічне моделювання:

– аналіз динамічних навантажень: використовують для симуляції поведінки цистерн під час руху, включаючи вплив прискорення, гальмування та маневрування на вантаж і конструкцію;
– моделювання рідин: дослідження поведінки рідини всередині цистерни (наприклад, коливання рідини під час гальмування), що може вплинути на стійкість автомобіля;

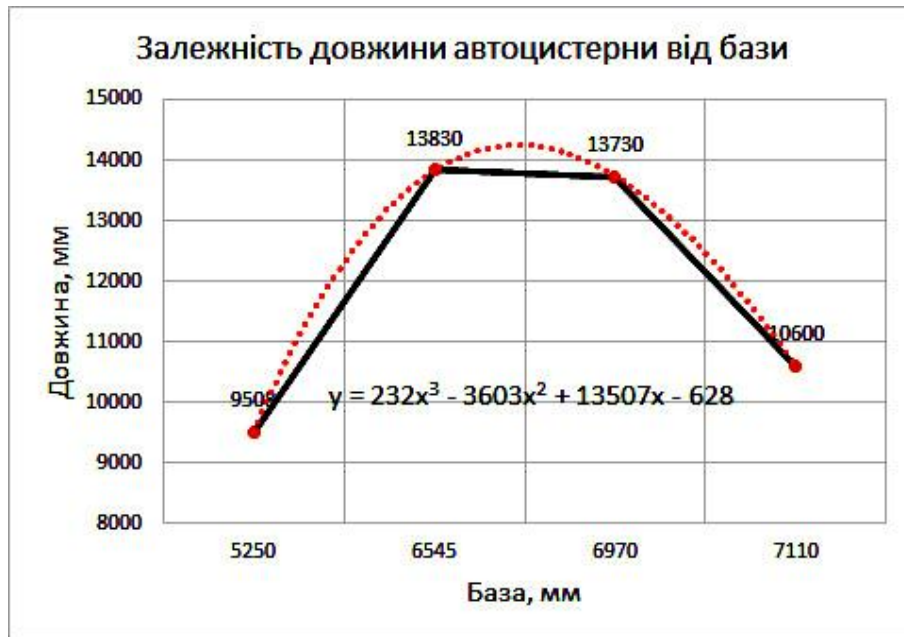


Рис. 1. Залежності довжини від бази
Fig. 1. Dependences of length on a base



Рис. 2. Залежності спорядженої маси від бази
Fig. 2. Dependences of the equipped mass on a base

3. Теплове моделювання:

– вплив температури: симуляції, що досліджують, як температурні коливання можуть вплинути на матеріали цистерни, особливо при транспортуванні хімічно активних чи температурно чутливих вантажів;

4. Моделювання аеродинаміки:

– CFD (Computational Fluid Dynamics): використовують для аналізу повітряного потоку навколо цистерн, що впливає на паливну ефективність та стабільність на дорозі;

– симуляція потоку: визначення опору повітря та впливу різних форм цистерн на аеродинаміку;

5. Оптимізація конструкції цистерни:

- параметричне моделювання: дослідження, як зміна певних параметрів конструкції (наприклад, товщина стінки, форма) вплине на загальні характеристики цистерни;
- генетичні алгоритми: використання алгоритмів для знаходження оптимальних рішень у проєктуванні цистерн;

6. Валідація та верифікація:

- порівняння з експериментальними даними: важливо перевіряти точність моделей, порівнюючи результати симуляцій з реальними випробуваннями;
- чутливість моделей: аналіз, як зміни в параметрах моделі впливають на результати, що допомагає виявити критично важливі фактори.

Моделювання та симуляція є потужними інструментами, які дозволяють дослідникам і інженерам оптимізувати проєктування та підвищувати безпеку автомобільних цистерн. Ці методи забезпечують глибоке розуміння механічних, динамічних і термічних властивостей, що є критично важливими для ефективної експлуатації:

1. Моделювання динамічних навантажень під час гальмування. Моделюється поведінка цистерни під час раптового гальмування. Включаються змінні, такі як маса вантажу, швидкість і гальмівне зусилля;

2. Аналіз впливу коливань рідини. Симуляція того, як рідина в цистерні реагує на рухи автомобіля (наприклад, повороти або нерівності на дорозі);

3. Тестування на втомленість матеріалів. Моделюється тривале навантаження на матеріали цистерни, щоб оцінити їхню втомленість;

4. Симуляція аеродинамічного навантаження. Аналіз впливу повітряного потоку на цистерну під час руху. Використовують моделі CFD для оцінки розподілу тиску на поверхні цистерни.

5. Моделювання впливу вантажопідйомності на стабільність. Вивчення, як різні рівні заповнення цистерни (пустота, половина, повна) впливають на стійкість під час руху.

Для таких симуляцій використовують програми, такі як:

- ANSYS: для FEM-аналізу;
- COMSOL Multiphysics: для моделювання багатофізичних процесів;
- MATLAB/Simulink: для динамічного моделювання систем.

При аналізі конструкцій автоцистерн були прораховані залежності довжини та спорядженої маси від бази (див. рис. 1, 2).

Висновки

На основі проведеного огляду літературних джерел можна зробити висновок, що вузько-спеціалізовані математичні моделі не завжди з необхідною точністю описують реальні фізичні процеси, що відбуваються при експлуатації автоцистерн, зокрема, для наближених до явища гідроудару і рух на поворотах.

Аналіз експлуатаційних властивостей автомобільних цистерн дозволяє виявити їхні сильні та слабкі сторони, а також можливості для покращення. Дослідження в цій галузі можуть привести до вдосконалення технологій виробництва, підвищення безпеки та зниження екологічного впливу.

Актуальними є такі дослідження для конструкцій напівпричепів автоцистерн безрамного типу.

Тому в подальших дослідженнях необхідно:

- розрахувати поздовжню стійкість автоцистерни;
- створити математичну модель відповідної складності, здатної описати рух автоцистерни, при якому можливе виникнення явища гідравлічного удару;
- дослідити різке гальмування автоцистерни: отримати залежності зусиль у сідлово-зчіпному пристрої і тисків на днище від часу, швидкості гальмування з врахуванням зміни рівня заповнення котла.

Інформаційні джерела

1. Гашук П. М. Загальні світові тенденції в царині проектування й виготовлення мобільної пожежно-рятувальної техніки. Північна Америка / П. М. Гашук, М. І. Сичевський // Зб. наук. паць «Пожежна безпека». – Львів: ЛДУ БЖД, 2016. – № 29. – С.18–35.
2. Кальченко В. І. Історія спеціалізованого автомобільного транспорту – Автомобіліцистерни для перевезення: рідини, сипучих вантажів, розчинів та зріджених газів. – Вип. 3, ч. 1. – Автомобілі-цистерни: навч. посібник / В. І. Кальченко, В. В. Кальченко, Г. В. Пасов. – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2021. – 308 с.
3. Кашканов А. А., Ребедайло В. М. К 31 Спеціалізований рухомий склад автомобільного транспорту: конструкція. Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 164 с.
4. Luikens Jim, Hedberg Mary. Standard Catalog Of Mercedes-Benz. – Krause Publications, 2009. – 224 p.
5. Guidelines on Maximum Weights and Dimensions of Mechanically Propelled Vehicles and Trailers – URL: <http://www.rsa.ie/en/RSA/Your-Vehicle/Vehicle-Standards/Weights—Dimensions/> (дата звернення: 15.01.2023).
6. Зінько Р. В. Основи конструктивного синтезу та динаміка спеціальних автомобілів і технологічних машин: монографія / Р. В. Зінько, Л. В. Крайник, О. З. Горбай. – Львів: Вид-во «ЛП», 2019. – 344 с.
7. Вікович І. А. Зниження динамічних навантажень у вантажних колісних машинах із пружно-демпфувальним зчленуванням: монографія / І. А. Вікович, Ю. М. Черевко, Р. В. Зінько. – Львів: Галицька Видавнича Спілка, 2018. – 166 с.
8. Чернобрівко М. В. Напружено-деформований стан елементів конструкцій при високошвидкісних навантаженнях: Дис. ... д-ра техн. наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України. – Харків, 2020. – 267 с.
9. Сахно В. П. До визначення стійкості руху автопоїзда з частково заповненою цистерною / В. П. Сахно, С. В. Цимба, Д. М. Попелиш // Вісник машинобудування та транспорту. – 2023 – № 1(17). – С. 138–146. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-17-1-138-146>.
10. Сахно В. П. До визначення гальмівних властивостей автопоїзда з частково заповненою цистерною. / В. П. Сахно, І. С. Мурований, В. М. Поляков, Д. М. Попелиш // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – 2023. – № 1 (20). – С. 228–238.
11. 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.
12. 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.
13. Александров Є. Є. Стійкість та автоколювання електронної замкнутої системи стабілізації курсу автомобіля з цистерною / Є. Є. Александров, Т. Є. Александрова, О. Л. Григор'єв, Я. Ю. Моргун // Вісник НТУ «ХП». Сер. «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – 2020. – № 1. – С. 44–63. <https://doi.org/10.20998/2222-0631.2020.01.04>.
14. Xue-lian Zheng. Rollover stability analysis of tankvehicles based on the solution of liquidsloshing in partially filled tanks / Xue-lian Zheng, Hao Zhang, Yuan-yuan Ren, Ze-hong Wei and Xi-gang Song //Advances in Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 9(6). – P. 1–26. DOI: 10.1177/1687814017703894.
15. Tran Van Nhu. Rollover stability analysis ofliquid tank truck taking into account the road profiles / Tran Van Nhu, Nguyen Xuan Ngoc, Vu Van Tan, Dang Tien Phuc // Journal of Applied Engineering Science . – 2022. – Vol. 20. – Br. 4. – Str. 1133-1142. DOI: 10.5937/jaes0-36578.
16. Ширін Л. Н. Транспортування нафти, нафтопродуктів і газу: навч. посібник / Л. Н. Ширін, О. В. Денищенко, С. Є. Барташевський, Є. А. Коровяка, В. О. Расцветаєв. – Дніпро: НТУ «ДП», 2019. – 203 с.
17. Кожушко А. П. Динамічний аналіз та методи поліпшення плавності ходу колісного трактора при транспортуванні рідких вантажів: Дис. ... д-ра техн. наук за спеціальністю 05.22.02 – автомобілі та трактори (13 – Механічна інженерія, 27 – Транспорт). – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 288 с.
18. Александров Є. Є. Про вплив коливань вільної поверхні рідини в цистерні на курсову стійкості автомобіля-паливозаправника / Є. Є. Александров, Т. Є. Александрова, О. П. Григор'єв, Я. Ю. Моргун // Озброєння та військова техніка. – 2021. – № 1. – С. 36–43. <https://doi.org/10.34169/2414-0651>.
19. Кожушко А. П. Математичне моделювання низькочастотних коливань в'язкої рідини в горизонтальній ємності з вільною поверхнею / А. П. Кожушко, О. Л. Григор'єв // Вісник НТУ «ХП». Сер. «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – 2018. – № 3. – С. 41–51.

20. Глущенко В. В. Експериментальне дослідження параметрів стійкості та динамічності автомобільних цистерн в дорожніх умовах / В. В. Глущенко, М. А. Подригало, Д. М. Клец, Є. О. Дубінін, Д. В. Абрамов // Науковий вісник ТДАТУ. – 2014. – Вип. 5. – Т. 1. – С. 30–38.
21. Кожушко А. П. Експериментальне та розрахункове дослідження згасання коливань рідини в ємності з вільною поверхнею // Вісник НТУ «ХП». Сер. «Математичне моделювання в техніці та технологіях». – 2020. – № 1. – С. 24–43. <https://doi.org/10.20998/2222-0631.2020.-01.03>.
22. 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 Нацгвардії України. – 2015. – Вип. 2. – С. 32–38. – URL: http://books.ndcnangu.co.ua/statti_NDL_2/ZNP_1_2015_Podrigalo.pdf
23. Світлий Ю. Г. Гідравлічний транспорт: монографія / Ю. Г. Світлий, В. С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім. Донецьке відділення НТШ. Редакція гірничої енциклопедії, 2009. – 436 с.
24. Pipe Flushing (Full procedure, standards NAS, Filter selection, magnetic filter config). – URL: <https://amarineblog.com/2017/08/01/pipe-flushing/> (дата звернення 29.09.2022).
25. Константинов Ю. М. Технічна механіка рідини і газу / Ю. М. Константинов, О. О. Гіжа. – Київ: Вища шк., 2002. – 358 с.
26. Tan-Atichat J. Interaction of free-stream turbulence with screens and grids: a balance between turbulence scales // Tan-Atichat J., Nagib H. M., Loehrke R. I. – Fluid Mech., 1982. – 114 p.
27. Krasowski E. Hydraulics. Hydraulics machines / E. Krasowski, I. Nikolenko, J. Gliński, A. Dashchenko, S. Sosnowski. – Lublin: Polish Academy of Sciences Branch in Lublin, 2011. – 350 p.
28. Науменко І. І. Технічна механіка рідини і газу / І. І. Науменко. – Рівне: Вид-во РДТУ, 2000. – 528 с.
29. Kang X. Directional dynamics of a partly-filled tank vehicle under braking and steering / Kang X., Rakheja S. and Stiharu I. // SAE technical paper no.2000-01-3477. <https://doi.org/10.4271/2000-01-3477>.
30. Богомаз Г. И. Динамика железнодорожных вагонов-цистерн / Г. И. Богомаз. – Киев: Наукова думка, 2004. – 223 с.
31. Шимановский А. О. Обзор исследований динамики автоцистерн / А. О. Шимановский // Транспорт: наука, техника, управление. – 2008. – № 11. – С. 23–28.
32. Про затвердження Правил дорожнього перевезення небезпечних вантажів. Наказ № 822 від 26.07.2004.
33. Про затвердження Порядку перевірки цистерн для перевезення небезпечних вантажів. Наказ № 166/550 від 12.05.2015.
34. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання. ДСТУ 3649:2010. – Київ: Держспоживстандарт України, 2011. – 30 с.
35. ДСТУ 7257:2012 Метрологія. Цистерни автомобільні для харчових рідин. Методика повірки (калібрування). – Київ: Мінекономрозвитку України, 2013.
36. Метрологія. Автомобільні цистерни для нафтопродуктів. Методика повірки. ДСТУ 8875:2019 (ДП «УкрНДНЦ»). – URL: <http://uas.gov.ua>.
37. Засоби транспортні дорожні. Причепи та напівпричепи спеціалізовані. Загальні технічні умови ДСТУ 3850-99. – Київ: Держстандарт України, 1999. – 35 с.
38. Про автомобільний транспорт: Закон України від 05. 04. 2001 р. № 2344-III // Відомості Верховної Ради України. – 2001. – № 22. – 105 с.
39. Статут автомобільного транспорту УРСР: Постанова від 25.01.1978 № 52. – URL: <http://www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/401-69-п.5>.
40. Правила перевезення вантажів автомобільним транспортом в Україні, затверджені наказом Міністерства транспорту України від 14.14.1997 р. № 363. – URL: <http://www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0128-98-п.6>.
41. Road vehicles. Functional safety: ISO 26262 // International Standardization Organization. – P. 5–6.
42. Road vehicles – Mechanical couplings between tractors and semi-trailers – Part 2: Interchangeability between low-coupling tractors and high-volume semi-trailers: ISO 1726-2:2007 // International Standardization Organization. – 23 p.
43. Liquid Transport Trailers. – URL: <https://dragonproductsltd.com/> (дата звернення: 15.01.2023).
44. ADR 2017 European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road // Corrigendum Ref. Sales No.: E.16.VIII.1 (ECE/TRANS/257, Vol. I and II).

45. Directive (EU) 2015/719 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2015 amending Council Directive 96/53/EC laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorised dimensions in national and international traffic and the maximum authorised weights in international traffic (Text with EEA relevance). – URL: <http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=celex:32015L0719> Annex I (дата звернення: 15.01.2023).

Jaroslav Vojtyk

Lviv Polytechnic National University

ANALYSIS OF STUDIES ON THE OPERATIONAL PROPERTIES OF TANK TRUCKS

Problem Statement and Purpose of the Work. The use of tankers, particularly with semi-trailers, for freight transportation ensures the delivery of bulk goods. This significantly improves the load capacity of tankers and reduces costs. There are many modifications of road tankers designed to transport various types of cargo, such as food products, chemicals, light and dark petroleum products. Despite the higher transportation cost compared to trucks, tankers are increasingly used. Moreover, there is no need for additional containers or packaging expenses, a high level of cargo safety is ensured during loading, transportation, and unloading, and the costs associated with these operations are reduced. Therefore, research into the operational properties of road tankers, and the development of relevant design solutions, is important to enhance their operational and economic efficiency. **Research Methodology.** A review of literature sources was conducted, focusing on studies related to the development of tanker designs, as well as research and regulatory documents. The analysis was carried out for chemical tankers, food tankers, fuel tankers, bitumen tankers, and gas tankers. The designs and characteristics of road tankers for standard operating conditions, isothermal tankers, and tankers for the transportation of hazardous materials were considered. **Article Results.** Based on the literature review, it can be concluded that highly specialized mathematical models do not always describe the real physical processes that occur during tanker operation with sufficient accuracy, particularly those related to hydraulic shock phenomena and movement during turns. These studies are especially relevant for frameless tanker semi-trailer designs. **Scientific Novelty.** The article provides a literature review on tanker design, operational issues, and relevant standards (DSTU), and presents mathematical dependencies between the main parameters of tankers. **Practical Significance of the Results.** The conducted review and analysis allow identifying the directions for further research and their importance. **Directions for Future Research.** Future studies should focus on the following: calculating the longitudinal stability of the tanker; creating a mathematical model of appropriate complexity capable of describing tanker movement where the occurrence of hydraulic shock is possible; investigating the effects of sudden braking of the tanker, and determining the dependencies of forces in the suspension system and pressures on the bottom over time, with consideration of changes in the filling level of the tank.

Keywords: Road tankers, operational properties, semi-trailers, designs, dynamic studies, hydraulic shock phenomenon, standards.

References

1. Hashchuk P. M. Zahal'ni svitovi tendentsiyi v tsaryni proektuvannya y vyhotovlennya mobil'noyi pozhezhno-ryatuval'noyi tekhniki. Pivnichna Ameryka [General Global Trends in the Design and Manufacture of Mobile Fire and Rescue Equipment. North America] / P. M. Hashchuk, M. I. Sychevskyi // Collection of Scientific Papers «Fire Safety». – Lviv: Lviv State University of Life Safety, 2016. – N 29. – P. 18–35. [in Ukrainian].
2. Kalchenko V. I. Istoriya spetsializovanoho avtomobil'noho transportu – Avtomobili-tsysterny dlya perevezennya: ridyny, syuchykh vantazhiv, rozchyniv ta zridzhenykh haziv [History of Specialized Motor Transport – Tank Trucks for Transporting: Liquids, Bulk Goods, Solutions, and Liquefied Gases]. – Issue 3, Part 1 – Tank Trucks: Textbook / V. I. Kalchenko, V. V. Kalchenko, H. V. Pasov. – Chernihiv: NU «Chernihiv Polytechnic», 2021. – 308 p. [in Ukrainian].
3. Kashkanov A. A., Rebedailo V. M. K Spetsializovanyy rukhomyy sklad avtomobil'noho transportu: konstruktsiya [Specialized Rolling Stock of Motor Transport: Design]. Textbook. – Vinnytsia: VDTU, 2002. – 164 p. [in Ukrainian].
4. Luikens Jim, Hedberg Mary. Standard Catalog Of Mercedes-Benz. – Krause Publications, 2009. – 224 s.

5. Guidelines on Maximum Weights and Dimensions of Mechanically Propelled Vehicles and Trailers [Electronic resource] – Access mode: <http://www.rsa.ie/en/RSA/Your-Vehicle/Vehicle-Standards/Weights--Dimensions/> (access date: 15.01.2023).
6. Zinko R. V. Osnovy konstruktyvnogo syntezy ta dynamika spetsial'nykh avtomobiliv i tekhnologichnykh mashyn: monohrafiya [Basics of Structural Synthesis and Dynamics of Special Vehicles and Technological Machines: Monograph] / R. V. Zinko, L. V. Kraiynyk, O. Z. Horbai. – Lviv: Publishing House «LP», 2019. – 344 p. [in Ukrainian].
7. Vikovych I. A. Znizhennya dynamichnykh navantazhen' u vantazhnykh kolisnykh mashynakh iz pruzhno-dempfuval'nym zchlenuvannyam: monohrafiya [Reducing Dynamic Loads in Freight Wheeled Vehicles with Elastic-Damping Couplings: Monograph] / I. A. Vikovych, Yu. M. Cherevko, R. V. Zinko. – Lviv: Halytska Publishing Union, 2018. – 166 p. [in Ukrainian].
8. Chernobryvko M.V. Napruzhenno-deformovanyy stan elementiv konstruktsiy pry vysokoshvydkisnykh navantazhen' [Stress-Strain State of Structural Elements under High-Speed Loads]. Dissertation for the Doctoral Degree in Technical Sciences, Specialization 01.02.04 – Mechanics of Deformable Solids. – A. M. Pidgorny Institute for Mechanical Engineering Problems, NAS of Ukraine, Kharkiv, 2020. – 267 p. [in Ukrainian].
9. Sakhno V. P. Do vyznachennya stiykosti rukhu avtopoyizda z chastkovo zapovnenoyu tsysternoyu [On the Determination of the Stability of a Road Train with a Partially Filled Tank] / V. P. Sakhno, S. V. Tsymba, D. M. Popelysh // Bulletin of Mechanical Engineering and Transport. – 2023. – N 1(17). – P. 138–146. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2023-17-1-138-146>. [in Ukrainian].
10. Sakhno V. P. Do vyznachennya hal'mivnykh vlastyvostey avtopoyizda z chastkovo zapovnenoyu tsysternoyu [On the Determination of Braking Properties of a Road Train with a Partially Filled Tank] / V. P. Sakhno, I. S. Murovaniy, V. M. Polyakov, D. M. Popelysh // Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport. – 2023. – N 1 (20). – P. 228–238. [in Ukrainian].
11. Sakhno V. P. Avtomatychne vyavlennya rezhymu rezhymu hal'muvannya avtopoyizda z chastkovo napovnenoyu tsysternoyu [Automatic Detection of Braking Mode of a Road Train with a Partially Filled Tank] / V. P. Sakhno, D. M. Popelysh, S. M. Tomchuk // Scientific and Industrial Journal «Avtoshlyakhovyk of Ukraine». – 2020. – No. 4. – P. 33–39. DOI: 10.33868/0365-8392-2020-4-264-33-39. [in Ukrainian].
12. Sakhno V. P. Ohlyad naukovykh doslidzen' shchodo dynamichnoho vplyvu ridyny na rukhomi rezervoary, zokrema tsysterny [Review of Scientific Studies on the Dynamic Impact of Liquid on Moving Tanks, Particularly Tank Trucks] / V. P. Sakhno, D. M. Popelysh, S. M. Tomchuk // Scientific and Industrial Journal «Avtoshlyakhovyk of Ukraine». – 2020. – No. 3. – P. 12–15. DOI: 10.33868/0365-8392-2020-3-263-12-15. [in Ukrainian].
13. Aleksandrov Y. Y. Stiykist' ta avtokolyvannya elektronnoji zamknutoyi systemy stabilizatsiyi kursu avtomobilya z tsysternoyu [Stability and Self-Oscillations of an Electronic Closed-Loop Course Stabilization System for a Tanker Vehicle] / Y. Y. Aleksandrov, T. Y. Aleksandrova, O. L. Hryhor'yev, Y. Yu. Morhun // Bulletin of NTU «KhPI». Ser. «Mathematical Modeling in Engineering and Technology». – 2020. – N 1. – P. 44–63. <https://doi.org/10.20998/2222-0631.2020.01.04>. [in Ukrainian].
14. Xue-lian Zheng. Rollover stability analysis of tank vehicles based on the solution of liquid sloshing in partially filled tanks / Xue-lian Zheng, Hao Zhang, Yuan-yuan Ren, Ze-hong Wei and Xi-gang Song // Advances in Mechanical Engineering. – 2017. – Vol. 9(6). – P. 1–26. DOI: 10.1177/1687814017703894.
15. Tran Van Nhu. Rollover stability analysis of liquid tank truck taking into account the road profiles / Tran Van Nhu, Nguyen Xuan Ngoc, Vu Van Tan, Dang Tien Phuc // Journal of Applied Engineering Science. – 2022. – Vol. 20. – Br. 4. – S. 1133–1142 DOI: 10.5937/jaes0-36578.
16. Shirin L. N. Transportuvannya nafty, naftoproduktiv i hazu: navch. posib. [Transportation of Oil, Petroleum Products, and Gas: Textbook] / L. N. Shirin, O. V. Denyshchenko, S. Ye. Bartashevskiy, Y. A. Korovyaka, V. O. Ratsvetaev. – Dnipro: NTU «DP», 2019. – 203 p. [in Ukrainian].
17. Kozhushko A. P. Dynamichnyy analiz ta metody polipshennya plavnosti khodu kolisnoho traktora pry transportuvanni ridkykh vantazhiv [Dynamic Analysis and Methods for Improving Ride Smoothness of Wheeled Tractors in Liquid Cargo Transportation]. Dissertation for the Doctoral Degree in Technical Sciences, Specialization 05.22.02 – Automobiles and Tractors (13 – Mechanical Engineering, 27 – Transport). – Kharkiv: NTU «KhPI», 2021. – 288 p. [in Ukrainian].
18. Aleksandrov Y. Y. Pro vplyv kolyvan' vil'noyi poverkhni ridyny v tsysterni na kursovu stiykist' avtomobilya-palivozapravnyka [Influence of Free Surface Oscillations of Liquid in a Tank on the Course Stability of a Fuel Tanker Vehicle] / Y. Y. Aleksandrov, T. Y. Aleksandrova, O. P. Hryhor'yev, Y. Yu. Morhun // Armament and

Military Equipment. – 2021. – No. 1. – P. 36–43. – URL: <https://doi.org/10.34169/2414-0651>. [in Ukrainian].

19. Kozhushko A. P. Matematychnе modeliuвання nyzkokhastotnykh kolyvan' v'yazkoyi ridyny v horizontal'niy yemnosti z vil'noyu poverkhneyu [Mathematical Modeling of Low-Frequency Oscillations of Viscous Liquids in a Horizontal Container with a Free Surface] / A. P. Kozhushko, O. L. Hryhor'yev // Bulletin of NTU «KhPI». Ser. «Mathematical Modeling in Engineering and Technology». – 2018. – No. 3. – P. 41–51. [in Ukrainian].

20. Hlushchenko V. V. Eksperymental'ne doslidzhennya parametriv stiykosti ta dynamichnosti avtomobil'nykh tsyctern v dorozhnikh umovakh [Experimental Study of Stability and Dynamic Parameters of Tank Trucks in Road Conditions] / V. V. Hlushchenko, M. A. Podryhalo, D. M. Klets, Y. O. Dubinin, D. V. Abramov // Scientific Bulletin of TDATU. – 2014. – Issue 5, Vol.1. – P. 30–38. [in Ukrainian].

21. Kozhushko A. P. Eksperymental'ne ta rozrakhunkove doslidzhennya zhasannya kolyvan' ridyny v yemnosti z vil'noyu poverkhneyu [Experimental and Computational Study of Liquid Oscillation Damping in Containers with a Free Surface] / A. P. Kozhushko // Bulletin of NTU «KhPI». Ser. «Mathematical Modeling in Engineering and Technology». – 2020. – No. 1. – P. 24–43. (<https://doi.org/10.20998/2222-0631.2020.-01.03>). [in Ukrainian].

22. Hlushchenko V. V. Enerhetychnyy pidkhid do otsinky ustiykosti avtomobiliv-tsyctern proty oprokydyvannya [Energy-Based Approach to Evaluating Tank Truck Stability Against Overturning] / V. V. Hlushchenko, R. O. Kaidalov, M. A. Podryhalo, S. A. Sokolovskiy // Collection of Scientific Works of the National Academy of the National Guard of Ukraine. – 2015. – Issue 2. – P. 32–38. – URL: http://books.ndcnangu.co.ua/statti_NDL_2/ZNP_1_2015_Podryhalo.pdf [in Ukrainian].

23. Svitlyi Y. H. Hidravlichnyy transport (monohrafiya) [Hydraulic Transport (Monograph)] / Y.H. Svitlyi, V.S. Biletskyi. – Donetsk: Eastern Publishing House. Donetsk Branch of the Shevchenko Scientific Society. Mining Encyclopedia Editorial Board, 2009. – 436 p. [in Ukrainian].

24. Pipe Flushing (Full procedure, standards NAS, Filter selection, magnetic filter config.) [Elektronnyy resurs]. – Rezhym dostupu: <https://amarineblog.com/2017/08/01/pipe-flushing/> (data zvernennya 29.09.2022).

25. Konstantinov Yu. M. Tekhnichna mekhanika ridyny i hazu [Technical Mechanics of Liquids and Gases] / Yu. M. Konstantinov, O. O. Hizha. – Kyiv: Higher School, 2002. – 358 p. [in Ukrainian].

26. Tan-Atichat J. Interaction of free-stream turbulence with screens and grids: a balance between turbulence scales // Tan-Atichat J., Nagib H. M., Loehrke R. I. – Fluid Mech., 1982. – 114 p.

27. Krasowski E. Hydraulics. Hydraulics machines / E. Krasowski, I. Nikolenko, J. Hliński, A. Dashchenko, S. Sosnowski. – Lublin: Polish Academy of Sciences Branch in Lublin, 2011. – 350 p.

28. Naumenko I. I. Tekhnichna mekhanika ridyny i hazu [Technical Mechanics of Liquids and Gases] / I. I. Naumenko. – Rivne: Publishing House of RSTU, 2000. – 528 p. [in Ukrainian].

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

30. Bohomaz H. I. Dynamika zaliznychnykh vahoniv-tsyctern [Dynamics of Railroad Tank Cars] / H. I. Bohomaz. – Kyiv: Naukova Dumka, 2004. – 223 p. [in Ukrainian].

31. Shymanovskiy A. O. Ohlyad doslidzhen' dynamiky avtotsystem [Review of Tanker Dynamics Studies] / A. O. Shymanovskiy // Transport: Science, Technology, Management. – 2008. – No. 11. – P. 23–28. [in Ukrainian].

32. Pro zatverdzhennya Pravyl dorozhn'oho perevezennya nebezpechnykh vantazhiv [Approval of the Rules for Road Transportation of Dangerous Goods]. Order No. 822 of 26.07.2004. [in Ukrainian].

33. Pro zatverdzhennya Poryadku perevirky tsyctern dlya perevezennya nebezpechnykh vantazhiv [On the Approval of the Procedure for Inspecting Tanks for the Transportation of Dangerous Goods]. Order No. 166/550 dated 12.05.2015. [in Ukrainian].

34. Kolisni transportni zasoby. Vymohy shchodo bezpechnosti tekhnichnoho stanu ta metody kontrolyuvannya [Wheeled Vehicles. Requirements for the Safety of Technical Condition and Control Methods]. DSTU 3649:2010. – Kyiv: State Consumer Standard of Ukraine, 2011. – 30 p. [in Ukrainian].

35. DSTU 7257:2012 Metrologiya. Tsycterny avtomobil'ni dlya kharchovykh ridyn. Metodyka povirky (kalibruvannya) [DSTU 7257:2012 Metrology. Automotive Tanks for Food Liquids. Calibration Methodology]. – Kyiv: Ministry of Economic Development of Ukraine, 2013. [in Ukrainian].

36. Metrologiya. Avtomobil'ni tsycterny dlya naftoproduktiv. Metodyka povirky [Metrology. Automotive Tanks for Petroleum Products. Calibration Methodology]. DSTU 8875:2019. SE «UkrNDNC». – URL: <http://uas.gov.ua> [in Ukrainian].

37. Zasoby transportni dorozhni. Prychypy ta napivprychypy spetsializovani. Zahal'ni tekhnichni umovy [Road Transport Vehicles. Specialized Trailers and Semi-Trailers. General Technical Specifications]. DSTU 3850-99. – Kyiv: State Standard of Ukraine, 1999. – 35 p. [in Ukrainian].
38. Pro avtomobil'nyy transport [On Road Transport]: Law of Ukraine dated 05.04.2001 No. 2344-III // Official Bulletin of the Verkhovna Rada of Ukraine. – 2001. – No. 22. – 105 p. [in Ukrainian].
39. Statut avtomobil'noho transportu URSR [Statute of Road Transport of the Ukrainian SSR]: Decree No. 52 dated 25.01.1978 [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/401-69-п>. [in Ukrainian].
40. Pravyl'a perevezennya vantazhiv avtomobil'nym transportom v Ukrayini, zatverdzeni nakazom Ministerstva transportu Ukrayiny vid 14.14.1997 r [Rules for the Carriage of Goods by Road in Ukraine, approved by Order of the Ministry of Transport of Ukraine dated 14.14.1997]. No. 363 [Electronic resource]. – Access mode: <http://www.zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0128-98-п>. [in Ukrainian].
41. Road vehicles. Functional safety: ISO 26262 // International Standardization Organization. – P. 5–6.
42. Road vehicles – Mechanical couplings between tractors and semi-trailers – P. 2: Interchangeability between low-coupling tractors and high-volume semi-trailers: ISO 1726-2:2007 // International Standardization Organization. – 23 p.
43. Liquid Transport Trailers. – URL: <https://dragonproductsltd.com/> (data zvernennya: 15.01.2023).
44. ADR 2017 European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road // Corrigendum Ref. Sales No.: E.16.VIII.1 (ECE/TRANS/257, Vol. I and II).
45. Directive (EU) 2015/719 of the European Parliament and of the Council of 29 April 2015 amending Council Directive 96/53/EC laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorised dimensions in national and international traffic and the maximum authorised weights in international traffic (Text with EEA relevance) [Elektronnyy resurs] – Rezhym dostupu do resursu: [http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=celex:32015L0719 Annex I](http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/EN/TXT/?uri=celex:32015L0719%20Annex%20I) (data zvernennya: 15.01.2023).