УДК 614.843
DOI: https://doi.org/10.52363/2524-2636.2025.9.1.2

Камран АЛМАЗОВ *(ORCID: 0000-0001-6483-351X)*
Академія Міністерства надзвичайних ситуацій, Баку, Азербайджан

ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ ПЕРЕКИДАННЯ ПОЖЕЖНОЇ АВТОЦИСТЕРНИ В УМОВАХ ПЕРЕСІЧЕНОЇ ЛІСОВОЇ МІСЦЕВОСТІ

У даній роботі наведені результати дослідження динамічних процесів у цистерні пожежного автомобіля з різним рівнем заповнення водою. Метою цієї роботи є отримання даних про флуктуацію центру мас динамічної системи, яку становить цистерна з водою пожежної автоцистерни, при її русі по пересіченій лісовій місцевості з різною швидкістю. Отримані дані дозволяють прогнозувати небезпеку перекидання пожежного автомобіля. У процесі вирішення завдання було створено математичну модель пожежної автоцистерни разом із водяною ємністю, використовуючи програмний комплекс моделювання динамічних систем LS-Dyna. Для відтворення динамічного впливу на автоцистерну із водяною ємністю рельєфу пересіченої лісової місцевості було встановлено часові залежності кутів поворотів цистерни. Отримані залежності використовувалися як граничні умови для відтворення динамічного впливу рельєфу. Кути повороту цистерни з водою пожежного автомобіля визначалися залежно від нерівностей рельєфу, геометрія яких обчислювалася генератором псевдовипадкових чисел. Використовуючи явний метод інтегрування рівнянь динаміки, реалізований у коді програмного комплексу LS-Dyna, було визначено закономірності флуктуацій центру мас цистерни з водою пожежного автомобіля в залежності від рівня заповнення та швидкості руху.

З використанням результатів, отриманих за допомогою математичного моделювання динамічних процесів у автоцистерні, було створено математичну модель оптимального маршруту даної автоцистерни для збереження її стійкості.

Ключові слова: *пожежна автоцистерна, пересічена лісова місцевість, флуктуація центру мас, метод гідродинаміки згладжених частинок, небезпека перекидання, модель оптимального маршруту.*

Постановка проблеми. Загальне зростання чисельності населення та щільності його мешкання, підвищення антропогенного тиску на навколишнє середовище, ускладнення самої техногенної сфери і підвищення її потенційної небезпеки, а також вплив глобальних кліматичних змін призводять до зростання ризиків значних людських втрат внаслідок виникнення масштабних природних і техногенних надзвичайних ситуацій та катастроф [1–3].

Статистичний аналіз сучасного стану із пожежами показує, що кількість та масштаб лісових пожеж має тенденцію до збільшення, що зумовлюється сучасними викликами природного, екологічного та техногенного характеру [1]. До основних транспортних засобів, що доставляють до осередків пожежі вогнегасні речовини та здійснюють гасіння пожежі залишаються пожежні автомобілі, зокрема пожежні автоцистерни [2, 3]. При експлуатації не до кінця заповненої водою пожежної автоцистерні при її русі пересіченою лісовою місцевістю виникає підвищений ризик її перекидання з огляду на флуктуації її центра мас. Це зумовлює те, що при експлуатації пожежних цистерн рекомендовано для пожежних підрозділів уникати рух лісовою пересіченою місцевістю із не до кінця заповненою цистерною, що еквівалентно забороні. Такі рекомендації доводиться кожний раз порушувати, оскільки сувора заборона експлуатації пожежних автоцистерн економічно та практично не обґрунтована. Тож основні дані рекомендації мають бути переглянуті з урахуванням результатів наукових досліджень. З огляду на викладене можна зробити

висновок, що дослідження закономірностей флуктуацій центру мас пожежних автоцистерн, викликаних динамічним впливом нерівностей при їх русі лісовою пересіченою місцевістю, є актуальною науково-технічною задачею.

В той же час, в умовах надзвичайних ситуацій заздалегідь визначити безпечні маршрути для доставки вогнегасного агенту до осередку пожежі можливо лише у деяких метеорологічних умовах за додаткових припущень про об'єми викидів небезпечних речовин [4 – 5], а у випадку виникнення та поширення лісової пожежі це зробити взагалі неможливо, оскільки заздалегідь не відома конфігурація осередку і, у зв'язку з цим, – конфігурація і зв'язність транспортної мережі (переміщення по частині доріг може стати неможливим). В таких випадках альтернативою плану евакуації може стати оперативний план пожежогасіння з врахуванням всіх логістичних особливостей і безпечного переміщення пожежних транспортних засобів, у тому числі автоцистерн. Розробка такого плану можлива лише при створенні відповідного програмного забезпечення, в основі якого повинен лежати прогноз розвитку лісової пожежі та математичні моделі знаходження оптимальних маршрутів з урахуванням вимог до стійкості пожежних автоцистерн до перекидання. Гарантування безпеки руху пожежних автоцистерн та зменшення часу транспортування вогнегасного агенту до осередків лісових пожеж може значно підвищити ефективність процесу їхньої локалізації. Тож створення математичних моделей безпечної та оптимальної логістики для спеціальної пожежної техніки, зокрема пожежних автоцистерн, є актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. В роботі [1] за рівнем небезпеки, що пов'язана із масштабом поширення, соціально-економічних втрат та екологічних наслідків, ландшафтні пожежі можна віднести до найбільш небезпечних. Для створення передумов для успішної боротьби з цими пожежами проводяться інтенсивні наукові дослідження майже у всіх сферах даної галузі. Причиною цього можуть бути об'єктивні труднощі, пов'язані з гасінням ландшафтних пожеж. Проте залишається актуальним питання збільшення мобільності засобів транспортування вогнегасних агентів до осередків пожежі при збереженні безпечних умов роботи пожежних підрозділів. Динамічним процесам, що відбувається у цистернах пожежних автомобілів присвячені роботи [2, 5]. В даних роботах сформульовані різні підходи щодо прогнозування динаміки даних систем. Проте, поза увагою залишилися динамічні процеси при сплесках води у цистернах при впливі конструкції шасі на дані процеси. В роботі [3] запропонований підхід представлення маси води в цистерні у вигляді маятникової динамічної системи. Даний підхід дозволяє визначати флуктуації центру мас динамічної системи, проте недоліком такого підходу є обмеження при врахуванні впливу внутрішньої системи хвилеломів та перегородок. Перспективним для моделювання динамічних процесів при русі пожежної автоцистерни представляється smoothed particles hydrodynamics (SPH) method [2, 7]. Згідно з ним вода у цистерні може бути імітована за допомогою частинок, даний метод дозволяє моделювання взаємної в'язкої взаємодії між частинками та огородженням цистерни. За таких умов зручно досліджувати флуктуації центра мас утвореної динамічної системи. Враховуючи складність математичних моделей, їхня реалізація можлива тільки при застосуванні спеціального програмного забезпечення. У роботі [8] для рішення науково-технічних задач пожежної безпеки дуже ефективно був застосований універсальний програмний комплекс LS-DYNA, що є розробкою Livermore Software Technology Corporation (LSTC) для дослідження динамічних систем. У коді обчислювального програмного комплексу LS-DYNA реалізований підхід для моделювання динаміки рідин на основі метода SPH у комбінації з explicit method. Інтегрування диференціальних рівнянь динаміки з їхньою апроксимацією за методом скінченних елементів, що є передумовою його використання для математичного моделювання динамічних процесів в пожежній автоцистерні при її русі пересіченою лісовою місцевістю.

Під час проведення гасіння лісових пожеж найчастіше буває задіяний спеціальний автотранспорт, зокрема автоцистерни [2 – 5]. Автоматизація процедури знаходження

оптимальних параметрів процесу транспортування вогнегасного агенту призводить до значного підвищення її ефективності за рахунок оперативності. У той же час, можливість використання обчислювальної техніки, зокрема – персональних комп'ютерів, потребує наявності відповідних програмних продуктів та адаптованих під їх вимоги вхідних даних.

Здійснюючи транспортування вогнегасних речовин в умовах бездоріжжя, пожежні автоцистерни рухатимуться у різних ландшафтно-топографічних умовах. На їхню швидкість переміщення впливають локальні значення природних чинників – тип ґрунту (підстилаючої поверхні) і рельєф місцевості. У зв'язку з цим виникає необхідність адекватного завдання даних факторів у кожній точці зони лісової пожежі. Крім цього має бути врахована безпека при забезпеченні пожежних автоцистерн щодо їхнього перекидання.

В роботі [9] запропоновано векторно-функціональну модель (ВФМ) завдання геоданих, що поєднує в собі можливості високоточного векторного опису меж полігонів з одночасним функціональним завданням фізичних параметрів усередині їх меж.

Як вхідні параметри моделі використовується векторний формат геоданих, що апроксимує кожну вихідну лінію (кордон полігону) ламаною, інформація про яку зберігається у вигляді впорядкованого масиву координат її N вершин.

Для оперативного розрахунку оптимальних шляхів транспортних засобів необхідно мати у своєму розпорядженні моделі впливу факторів ландшафту, тактико-технічних характеристик і параметрів на швидкість руху даних транспортних засобів.

На швидкості транспортних засобів як на дорогах, так і в умовах поза дорогою на місцевості впливають місцевість [2 – 5]. У вказаних роботах приведені дані для швидкості транспортних засобів, залежно від їхніх технічних характеристик та крутості нахилу.

Маючи інформацію про потужність двигунів, можна отримати значення швидкості руху транспортного засобу від крутості нахилу.

Встановлено, що безпечний рух транспортного засобу на поверхні рельєфу і, відповідно, можливість його руху в азимутальному напрямку залежить від його технічних характеристик та крутості рельєфу в напрямку та перпендикулярно до нього [4, 5, 9]. В зазначених роботах визначаються допустимі напрямки руху транспортного засобу на поверхні неоднорідного рельєфу. Рух переднім ходом транспортного засобу у напрямку його орієнтації є еквівалентним у цьому напрямку.

Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого обґрунтуванню та розробці моделей безпечної та оптимальної логістики для спеціальної пожежної техніки, зокрема пожежних автоцистерн при їхньому русі пересіченою місцевістю під час гасіння лісових пожеж.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується стаття. Попри значну кількість досліджень, присвячених динаміці рідин у цистернах транспортних засобів, залишаються відкритими питання щодо врахування впливу хвилеломів, перегородок та нерівномірного заповнення резервуарів на флуктуації центра мас під час руху по пересіченій місцевості. Існуючі математичні моделі або не дозволяють точно змоделювати внутрішні динамічні процеси у цистерні, або мають обмежену прикладну ефективність через складність реалізації. Зокрема, маятникова модель не враховує конструктивних особливостей резервуарів, тоді як підхід на основі рівнянь Нав'є-Стокса ускладнює оцінку стійкості транспорту через складність розрахунку центра мас.

Крім того, нині відсутнє інтегроване рішення, яке б поєднувало моделювання внутрішньоцисерної динаміки, стійкості транспортного засобу до перекидання та адаптацію до реальних топографічних умов, представлених у вигляді цифрових моделей місцевості. Геоінформаційні системи мають значний потенціал у вирішенні цього завдання, однак потребують удосконалення з точки зору поєднання векторно-функціональної моделі місцевості з фізико-динамічними характеристиками рухомої пожежної техніки. Таким чином, актуальним є створення математичної моделі та інструментального рішення для забезпечення безпечної експлуатації пожежних автоцистерн у складних умовах рельєфу під час гасіння ландшафтних пожеж.

Постановка задачі та її розв'язання. Мета дослідження полягає у виявленні закономірностей флуктуацій центру мас пожежних автоцистерн, викликаних динамічним впливом нерівностей при їх русі лісовою пересіченою місцевістю як наукового підґрунтя для створення математичної моделі безпечної та оптимальної логістики для пожежних автоцистерн під час гасіння лісових пожеж.

Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

– розробити геометричну та математичну модель однієї з найбільш поширених пожежних автоцистерн із водяною ємністю із використанням можливостей програмного комплексу LS-DYNA;

– розробити математичну модель рельєфу пересіченої лісової місцевості для її відтворення її впливу при прикладанні граничних умов до динамічної системи цистерни із водою пожежного автомобіля при його русі пересіченою лісовою місцевістю;

– з використанням розробленої математичної моделі пожежної автоцистерни дослідити динамічні процеси у ємності із водою та виявити закономірності флуктуацій центру мас пожежних автоцистерн, викликаних динамічним впливом нерівностей при їх русі лісовою пересіченою місцевістю;

– на основі виявлених закономірностей надати рекомендації щодо співвідношень між рівнем заповнення водою резервуару пожежної автоцистерни та її швидкістю руху пересіченою лісовою місцевістю.

– з використанням сформульованих рекомендацій розробити математичну модель безпечної та оптимальної логістики для пожежних автоцистерн під час гасіння лісових пожеж.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих результатів. Для вивчення впливу рельєфу поверхні на динамічні процеси, які відбуваються у резервуарі пожежної автоцистерни при її русі лісовою пересіченою місцевістю був розглянутий один з найбільш поширених варіантів, – пожежна автоцистерна АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364, яка може бути застосована для гасіння ландшафтних пожеж водою та повітряно-механічною піною. Зовнішній вигляд автоцистерни разом із розташованим резервуаром із водою наведений на рис. 1. Тут же наведено внутрішню структуру резервуара автоцистерни.



Рисунок 1 – Розташування резервуара із водою в пожежній автоцистерні

Основним очікуваним результатом, який має бути отриманим під час дослідження руху рідини у цистерні є закономірності зміни положення центру мас механічної системи, що включає у себе саму цистерну та воду, що знаходиться у цистерні. Для цього має бути поставлена відповідна задача, де мають бути враховані вплив рельєфу поверхні лісової пересіченої місцевості, по якій здійснюється рух автомобіля, на динамічні процеси у цистерні із водою, визначена відповідна математична модель, що відтворює рух рідини у цистерні із можливістю прогнозувати положення центру мас механічної системи, яка складається із води та цистерни, визначити відповідний метод числової реалізації інтегрування рівнянь динаміки запропонованої математичної моделі і на основі даного методи виконати відповідні обчислення. При цьому слід задати математичне описання рельєфу поверхні лісової пересіченої місцевості, математичне описання взаємодії рідини у її внутрішніх шарах, взаємодію рідини із твердими стінками цистерни, а також врахувати при цьому відповідні властивості речовин та матеріалів, таких як в'язкість рідини, жорсткість поверхні твердого матеріалу, інерційні характеристик речовин тощо. Таким чином, для постановки задачі були прийняті такі припущення та гіпотези.

1. До розгляду приймається механічна система, що складається із шассі автомобіля на яке встановлений корпус ємності із водою, причому інерційні характеристики останньої приймаються незначно малими, для того щоб можна було оцінювати тільки флуктуації центра мас даної системи за рахунок руху води, щоб потім можна було б дані флуктуації врахувати при аналізі задачі флуктуацій центра мас механічної системи, куди входять всі елементи пожежної автоцистерни.

2. Огороджувальна конструкція цистерни представляється як абсолютно тверде тіло, причому його пружні характеристики враховуються тільки при описанні контактної взаємодії між рідиною та огородженням.

3. Вода у цистерні представляється кінцевою кількістю частинок, що характеризуються тільки масою та мають зникаюче малі геометричні розміри. Для описання руху частинок та їх контактної взаємодії застосовується гідродинамічна модель гладких частинок SPH (Smooth Particles Hydrodynamics) [2, 7]. Між частинками відбувається взаємодія за гідродинамічною моделлю Монагана [2, 7] утвореної системи, в'язкість якої подібна до в'язкості води. Це у свою чергу дозволяє обчислювати положення центру мас утвореної системи

4. Рух системи розглядається за нормальних атмосферних умов, гравітації та температури і теплообмін між водою та стінками цистерни не розглядається

5. При аналізі контактної взаємодії частинок та огороджувальною поверхнею застосовується відповідна математична модель контакту, заснована на методі штрафних функцій [2, 8].

6. Для описання динаміки частинок, їх контактної взаємодії між собою та стінками цистерни застосовується метод інтегрування узагальнених рівнянь динаміки за допомогою неявного метода [2, 7, 8].

7. При розгляді динаміки системи процеси демпфування та розсіювання енергії у системі амортизації автомобіля не розглядаються.

8. Для формування руху цистерни під впливом рельєфу поверхні випадковість появи нерівностей рельєфу враховується при використанні генераторів псевдовипадкових чисел.

9. Для моделювання руху цистерни використовуються її повороти відносно горизонтальних осей, що відтворюють крен та рискання, а також вертикальне переміщення. Поворот навколо вертикальної вісі (тангаж) не враховується.

В якості основної робочої гіпотези було прийнято, що основними параметрами, які визначають рух цистерни при доланні автомобілем лісової пересіченої місцевості при врахуванні впливу локального рельєфу є повороти навколо горизонтальних осей та вертикальне переміщення, як показано на схемі, наведеної на рис. 2.



а. *б.*

Рисунок 2 – Розрахункові схеми до визначення крену (*а*) та рискання (*б*) пожежного автомобіля АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364

Відповідно до схем на рис. 2, кути повороту можна визначити за вертикальними переміщеннями задньої та передньої осей автомобіля. Кут крену, кут рискання та вертикальне зміщення за рахунок взаємного руху коліс визначається за формулами:

$$\alpha = \text{arctg}((Z_r - Z_l)/l_w);\ \beta = \text{arctg}((Z_f - Z_b)/L_w);\ Z = (Z_r + Z_l)/2 + (Z_f + Z_b)/2 \qquad (1)$$

При визначенні кутів повороту локального рельєфу задається окрема послідовність нерівностей поверхні для правого та лівого колеса задньої вісі. Локальний рельєф із врахуванням рекомендацій [2] задається як послідовність типової ділянки треку, вигляд якої наведений на рис. 3.

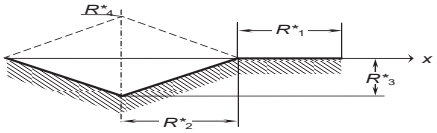


Рисунок 3 – Схема до визначення ділянки із локальною нерівністю еталонного треку для дослідження флуктуацій положення центра мас механічної системи цистерни з водою

При використанні схеми, що зображена на рис. 3, була записана функція, що визначає форму нерівності еталонного треку для дослідження флуктуацій положення центра мас механічної системи цистерни з водою у вигляді:

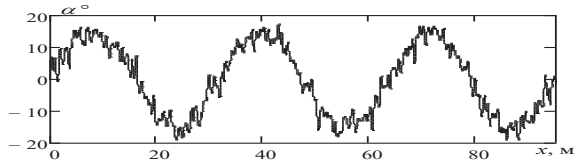
$$Z(x) = \begin{cases} (-1)^{R^*_4} \dfrac{R^*_3}{R^*_2} x,\ 0 \le x < R^*_2 \\ (-1)^{R^*_4} \left(R^*_3 - \dfrac{R^*_3}{R^*_2} x \right),\ R^*_2 \le x < 2R^*_2 \\ 0,\ 2R^*_2 \le x < R^*_1 + 2R^*_2 \end{cases} \qquad (2)$$

де R^*_1, R^*_2, R^*_3, R^*_4 – величини, отримані за допомогою генератора псевдовипадкових чисел, що належать діапазонам, які наведені у табл. 1.

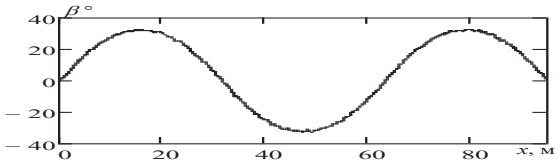
Таблиця 1 – Діапазони величин для відтворення нерівностей локального рельєфу треку для дослідження флуктуацій положення центра мас механічної системи цистерни з водою

Параметр R^*_1, м	Параметр R^*_2, м	Параметр R^*_3, м	Параметр R^*_4
0,2 – 0.5	0,2 – 0,5	0,05 – 0,2	1 або 2

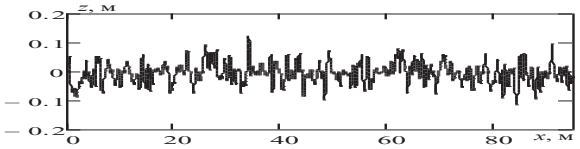
Для відтворення можливих варіантів розглядається три випадки руху автоцистерни із швидкостями 6 км/год, 4 км/год та 2 км/год. Таким чином було отримано 3 набори законів переміщень для цистерни пожежного автомобіля. На рис. 4., як приклад, представлені закони переміщення автоцистерни для швидкості 6 км/год.



а.



б.



в.

Рисунок 4 – Закони переміщень цистерни при русі пожежного автомобіля по еталонному треку лісової пересіченої місцевості зі швидкістю 6 км/год: *а* – кут крену; *б* – кут рискання; *в* – вертикальне переміщення

Основні компоненти математичної моделі динамічних процесів у резервуарі пожежної автоцистерни при її русі лісової пересіченою місцевістю подані у табл. 2.

Таблиця 2 – Основні компоненти математичної моделі та методи її реалізації

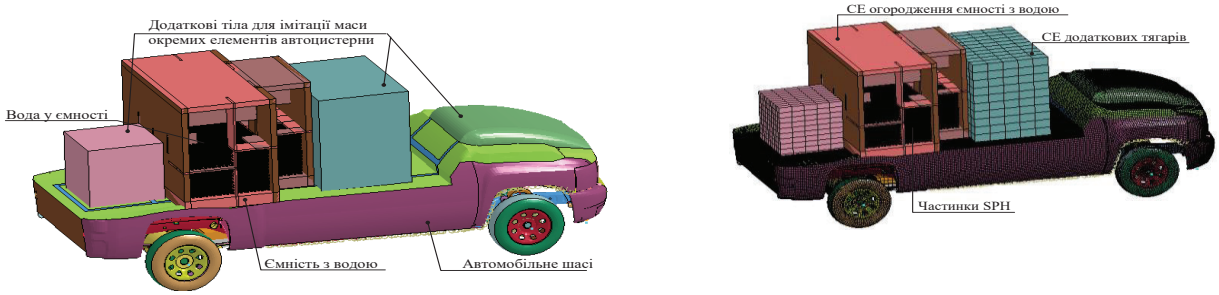
Компонент (метод)	Спосіб реалізації	Джерело
Базова система рівнянь	Система диференціальних рівнянь на основі законів збереження	[2, 7, 8]
Математична модель рідини	Метод гідродинаміки згладжених частинок	[2, 7, 8]
Метод числової реалізації	Явний метод у комбінації із методом скінченних елементів	[2, 7, 8]
Контактна взаємодія	Метод штрафних функцій	[2, 8]

Процес обчислення за наведеною математичною моделлю відбувається у такій послідовності.

1. Встановлюються граничні умови та умови контактної взаємодії між частинками та поверхнею суміжних частин моделі.
2. Визначаються прискорення частинок.
3. Визначаються швидкості руху частинок.
4. За наведеним математичним апаратом визначається згладжувальна довжина частинок.
5. Частинки ідентифікуються за ознакою контакту між ними.
6. Визначаються коефіцієнти густини та деформацій.

Конструктивна система пожежної автоцистерни АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364 разом із водяною ємністю наведена на рис. 5 (а). На даній конструктивній схемі видно, що на шасі автомобіля встановлена ємність із водою і додаткові тягарі, що відтворюють конструктивні елементи даної автоцистерни. Використовуючи отриману геометричну модель конструктивної системи автоцистерни, була побудована скінченно-елементна схема представлена на рис. 5 (б).

Для моделювання елементів механічної системи, що представляє цистерну із водою застосовується два типи матеріалів: матеріал частинок та матеріал огородження цистерни. Основні відомості щодо моделей даних матеріалів наведені у табл. 3. [2, 8].



а. *б.*

Рисунок 5 – Конструктивна (*а*) та скінченно-елементна (*б*) схема пожежної автоцистерни АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364 разом із водяною ємністю

Важливою особливістю є наявність отворів та вікон у перегородках для нормального переміщення рідини при відкачуванні або закачуванні води із збереженням здатності блокування утворення великих хвиль у цистерні при її русі по рельєфній місцевості. Проте велика кількість кругових контурів отворів збільшує кількість елементів, зменшує продуктивність розрахунків та погіршує умови контактної взаємодії. Тож для математичного моделювання використане спрощене відтворення геометричної конфігурації перегородок. Спрощена геометрична конфігурація цистерни разом із перегородками представлена на рис. 6.

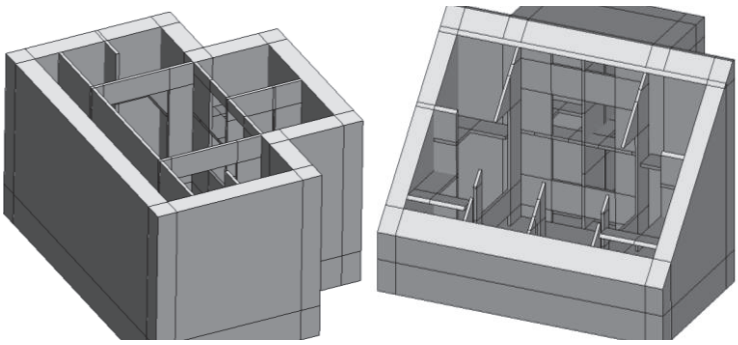


Рисунок 6 – Схема спрощеної геометричної конфігурації ємності для води автоцистерни разом із перегородками

Таблиця 3 – Основні відомості щодо моделей матеріалів механічної системи цистерни з водою

Матеріал для моделювання частинок	Матеріал для моделювання огородження цистерни
Модель враховує параметри ідеалізованого матеріалу, в якому немає необхідності розраховувати внутрішні напруження що входять до девіатору напружень. У цьому випадку можна знехтувати міцністю матеріалу. В'язкі напруження визначаються за формулою: $\sigma_{ij} = \mu\dot{\varepsilon}'_{ij}$, де $\dot{\varepsilon}'_{ij}$ – швидкості нарощування девіаторних деформацій. Враховується можливість завдання контактної взаємодії між частинками та твердим тілом	Дана модель матеріалу застосовується при відсутності необхідності розглядати напружено-деформований шар у його внутрішніх шарах. У то же час залишається можливість завдання інерційних характеристик тіл. Також для даного матеріалу залишається актуальним завдання його пружних характеристик, що є необхідним аспектом для завдання пружної взаємодії при контакті тіл із даною моделлю матеріалу із іншими тілами.

Для взаємодії між частинками та огородженням цистерни пожежного автомобіля застосовується теорія контактної взаємодії між вузлами та поверхнями, детально описана в [2, 8]. Для ідентифікації контакту між точкою та поверхнею застосовується метод штрафних функцій, а для умов силової взаємодії застосовуються наперед задані пружні характеристики матеріалів.

Параметри властивостей матеріалів, що були використані для побудування комп'ютерної моделі були прийняті за даними, які наведені у роботах [2]. В табл. 4, наведені величини прийнятих параметрів властивостей матеріалів.

Таблиця 4 – Величини параметрів щодо властивостей матеріалів побудування моделі цистерни із водою пожежного автомобіля АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364

Матеріал	Густина, ρ, кг/м^3	Модуль пружності, E, МПа	Коефіцієнт Пуасона, ν	В'язкість (штучна), μ
Поліпропілен (огородження цистерни)	0,001	900	0,25	-
Нуль-матеріал (матеріал частинок)	1000	-	-	0,001

Використовуючи наведені дані була побудована відповідна комп'ютерна модель цистерни з водою пожежного автомобіля АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364.

Після проведення розрахунків були отримані результати у вигляді зображень геометричної конфігурації води у цистерні у кожний момент часу руху пожежного автомобіля АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364 (рис. 7) відповідно до значення вибраного часового кроку запису інформації у вихідний файл результатів програмного комплексу LS-DYNA. Для уявлення про отримані дані, які були отримані у ході обчислень, були вибрані моменти часу, коли автомобіль займає положення із найбільшим кутом рискання при його русі зі швидкістю 6 км/год.

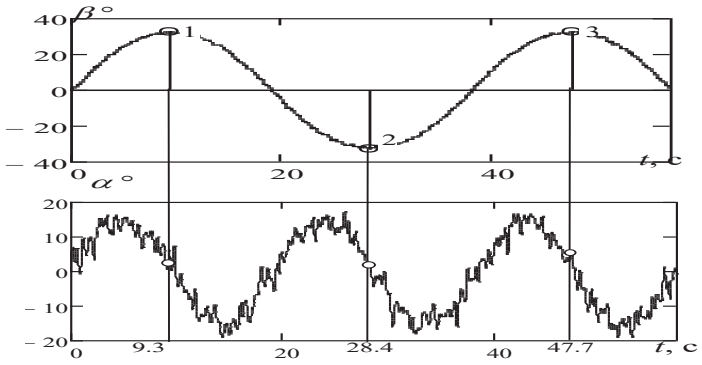
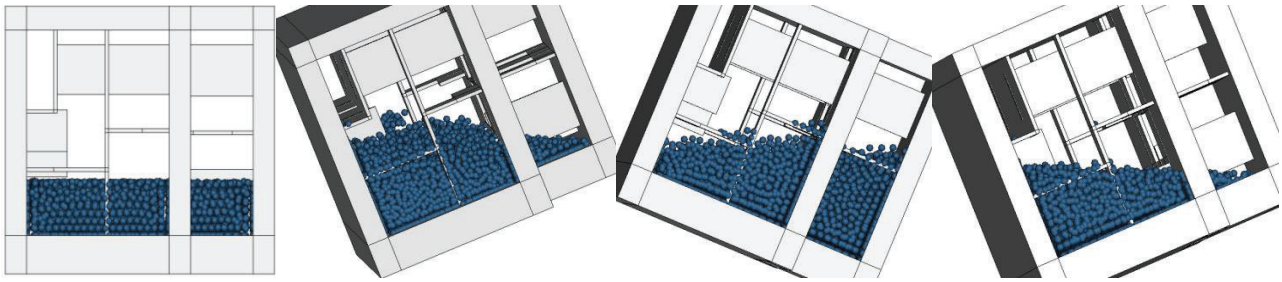


Рисунок 7 – Моменти часу для візуалізації зображення позиції цистерни із водою пожежного автомобіля АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364

Положення цистерни із водою із рівнем заповнення 25% пожежного автомобіля АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364 для різних моментів часу при його русі зі швидкістю 6 км/год еталонним треком по лісовій пересіченій місцевості наведено на рис. 8.

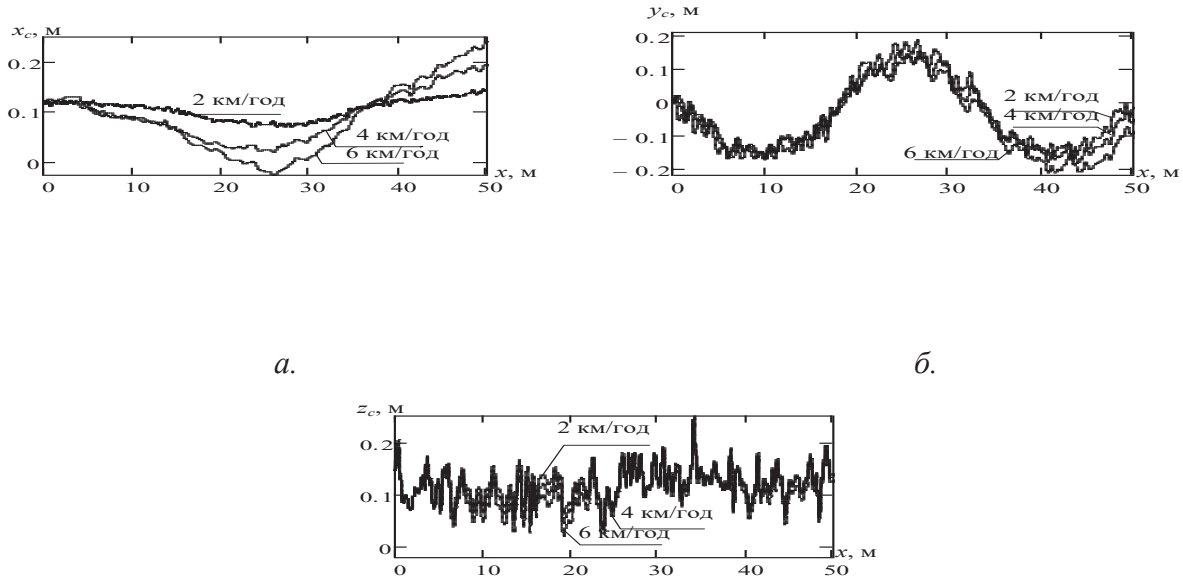


а. *б.* *в.* *г.*

Рисунок 8 – Положення цистерни із 25 % рівнем заповнення водою пожежного автомобіля АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364 для різних моментів часу при його русі зі швидкістю 6 км/год еталонним треком по лісовій пересіченій місцевості: *а* – 0 с, *б* – 9,3 с, *в* – 28,4 с, *г* – 47,7 с

Аналізуючи зображення геометричної конфігурації води у цистерні у кожний момент часу руху пожежного автомобіля АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364 та загальних результатів розрахунків, можна помітити, що запроваджена система хвилеломів та перегородок ефективно запобігає утворенню великих хвиль, що могли б суттєво вплинути на зміщення центру мас автомобіля.

На рис. 9, наведені графіки залежності локальних координат центру мас цистерни у залежності від величини швидкості руху пожежного автомобіля вздовж еталонного треку по лісовій пересіченій місцевості для заповнення цистерни пожежного автомобіля водою на 25 %.



а. *б.*

в.

Рисунок 9 – Локальні координати центру мас цистерни із рівнем її заповнення 25 % при русі пожежного автомобіля по еталонному треку лісової пересіченої місцевості із різними швидкостями.

Графіки на рис. 9 показують, що на флуктуації центра тяжіння відносно поздовжньої горизонтальної та вертикальної вісі пожежної автоцистерни її швидкість руху вздовж еталонного треку впливає неістотно. Найбільший вплив швидкості руху можна побачити щодо поперечної вісі автоцистерни. Це може бути пояснено за рахунок більших сил інерції при доланні пагорбів, що відтворюється масштабним рельєфом еталонного треку.

Для того щоб прослідкувати положення центра мас цистерни із різним рівнем її заповнення водою у процесі руху пожежної автоцистерни було побудовано траєкторію його руху при швидкості руху автомобіля 6 км/год. На рис. 10, наведено криву, що відтворює цю траєкторію.

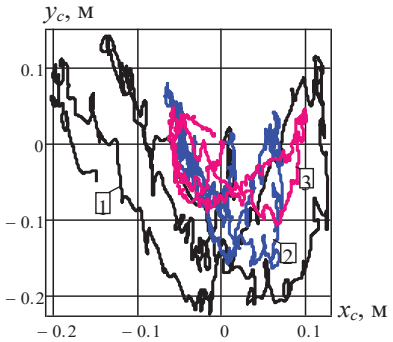


Рисунок 10 – Траєкторії руху положення центра мас цистерни при швидкості руху пожежного автомобіля 6 км/год еталонним треком лісової пересіченої місцевості із різним рівнем заповнення водою: 1 – 25 %; 2 – 50 %; 3 – 75 %

Траєкторії руху положення центра мас цистерни при швидкості руху пожежного автомобіля 6 км/год еталонним треком лісової пересіченої місцевості побудовані з урахуванням початкового положення центру мас. На рис. 10 можна побачити, що геометричний центр області положень центра мас зміщений на певну величину відносно початкового положення центра мас цистерни із водою. На рис. 11 наведено конфігурації областей положень центра мас цистерни із різними значеннями рівня її заповнення водою.

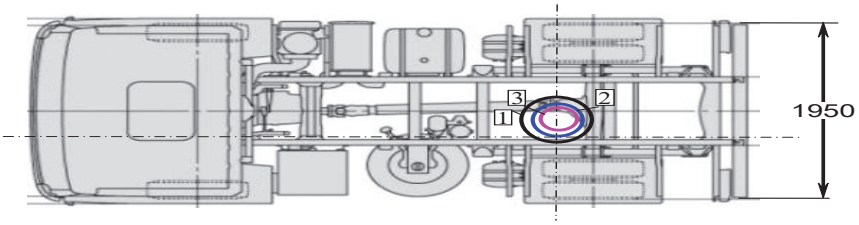


Рисунок 11 – Конфігурації областей положень центра мас цистерни при русі пожежного автомобіля 6 км/год еталонним треком лісової пересіченої місцевості із різними значеннями рівня заповнення цистерни водою:1 – 25 %; 2 – 50 %; 3 – 75 %

Для вивчення залежності найбільшого зміщення центра мас цистерни при русі пожежного автомобіля було побудовано залежності цієї величини від найбільш значущого параметра – рівня заповнення цистерни. На рис. 12 наведені залежності найбільшого поперечного зміщення центра мас цистерни при русі пожежного автомобіля від рівня її заповнення.

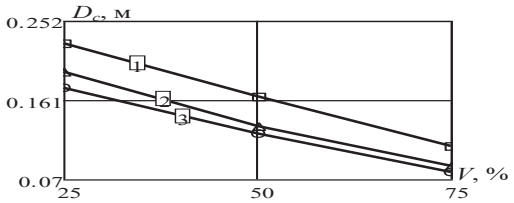


Рисунок 12 – Залежності найбільшого поперечного зміщення центра мас цистерни при русі пожежного автомобіля від рівня її заповнення зі швидкістю: 1 – 6 км/год; 2 – 4 км/год; 3 – 2 км/год

На рис. 12 можна побачити, що залежності максимального поперечного зміщення положення розташування центра мас цистерни при русі пожежного автомобіля від рівня її заповнення мають характер, що наближений до лінійного. Найбільш значущим параметром, що впливає на зміщення положення розташування центра мас цистерни при русі пожежного автомобіля є рівень заповнення цистерни, проте в певній мірі на даний параметр впливає також і швидкість руху пожежного автомобіля.

З метою побудування математичної моделі, що описує залежність найбільшого зміщення центра мас цистерни із водою від найбільш значущих параметрів, які визначають умови руху пожежного автомобіля. До таких параметрів належать рівень заповнення цистерни пожежного автомобіля та швидкість його руху лісовою пересіченою місцевістю.

Аналіз даних, представлених на рис. 12, показує, що така залежність може бути описана простою двох факторною лінійною регресією типу [8, 9]:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_1x_2, \quad (3)$$

де x_1, x_2 – фактори, що визначаються параметрами, a_i – виражають умови руху пожежної автоцистерни лісовою пересіченою місцевістю.

Оскільки фактори даної регресії незалежні за своєю природою, можна отримати її коефіцієнти при використанні найпростішого ортогонального плану першого порядку згідно із [10, 11].

Згідно із матрицею прийнятого плану мають бути визначені величини найбільшого поперечного зміщення центра мас цистерни із водою при русі пожежного автомобіля. При цьому дані величини визначаються при варіюванні прийнятих найбільш значущих факторів моделі.

Таблиця 5 – Інтервали варіювання факторів згідно із планом числового експерименту

Рівень заповнення, V, %			Швидкість руху автомобіля, v, км/год		
Найменше значення, V_{-1}	Середнє значення, V_0	Найбільше значення, V_1,	Найменше значення, q_{-1}	Середнє значення, q_0	Найбільше значення, q_1
25	50	75	2	4	6

Варіюючи прийняті найбільш значущі параметри згідно із табл. 5, за результатами проведених обчислень, представлених на рис. 9 – 10 були отримані відповідні значення максимального зміщення центра мас цистерни із водою при русі пожежного автомобіля. Отримані величини подані у табл. 6.

Таблиця 6 – Величини максимального зміщення центра мас цистерни із водою при русі пожежного автомобіля, отримані у результаті проведення числового експерименту згідно із планом

Експериментальна ситуація	1	2	3	4
Максимальне зміщення положення центру мас цистерни із водою, y, мм	108	78	226	175

Використовуючи дані табл. 6 визначаються коефіцієнти регресії (3) у кодованому вигляді за формулами [10, 11]:

$$a_0 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} y_i;\ a_1 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_1y_i;\ a_2 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_2y_i;\ a_3 = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_1x_2y_i, \quad (4)$$

де $N = 4$ – кількість окремих експериментів за прийнятим планом;
x_i – значення параметру згідно із матрицею плану;
y_i – значення максимального зміщення центру мас за табл. 6.

Отримані значення коефіцієнтів наведені у табл. 7.

Таблиця 7 – Коефіцієнти регресії для максимального зміщення центра мас цистерни із водою при русі пожежного автомобіля

Коефіцієнти регресії	a_0	a_1	a_2	a_3
У кодованому вигляді	146,75	20,25	-53,75	-5,25
Реальні коефіцієнти	192,75	1,23	-21,625	-0,105

Використовуючи побудовану математичну модель зміщення центра мас цистерни із водою при русі пожежного автомобіля у вигляді регресійної залежності була побудована відповідна номограма для визначення величини максимального зміщення центра мас вибраних найбільш значущих параметрів руху автоцистерни при її русі лісовою пересіченою місцевістю. Побудована номограма представлена на рис. 13.

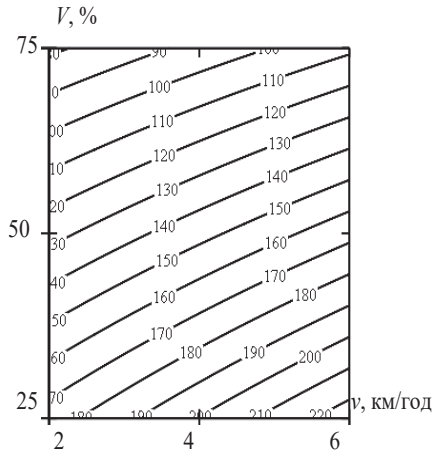


Рисунок 13 – Номограма для визначення величини максимального зміщення (мм) центра мас цистерни із водою у залежності від швидкості автоцистерни при її русі лісовою пересіченою місцевістю та рівня її заповнення

Отримана математична модель дозволяє прогнозувати максимальне зміщення центра мас цистерни із водою у залежності від швидкості автоцистерни при її русі лісовою пересіченою місцевістю та рівня її заповнення.

Результати досліджень щодо максимальне зміщення центра мас цистерни може бути використана для обчислення зміщення мас всього автомобіля вцілому. Враховуючи відомості про габарити автомобіля можна обчислити ті направлення руху, які призведуть до втрати стійкості автоцистерни на похилій поверхні рельєфу в залежності від кута її нахилу. Відповідно, можливо отримання заборонених напрямків руху, як це зроблено в роботах [5, 12], але вже з урахування динамічного положення центру мас і, на відміну від детермінованої моделі топооснови в зазначених роботах, з врахуванням випадкової складової поверхні рельєфу. Це, в свою чергу, дозволяє побудувати поле індикатрис швидкості руху автоцистерни, тобто знайти швидкість руху автомобіля в кожній точці топооснови в будь якому напрямку. Використання принципу Гюйгенса при отримання областей транспортної досяжності [5, 12] дозволяє побудувати оптимальні (в сенсі часу прибуття) маршрути руху автоцистерни в умовах бездоріжжя з урахуванням реальних топографічних умов.На рис. 14 наведені приклади побудування таких маршрутів.

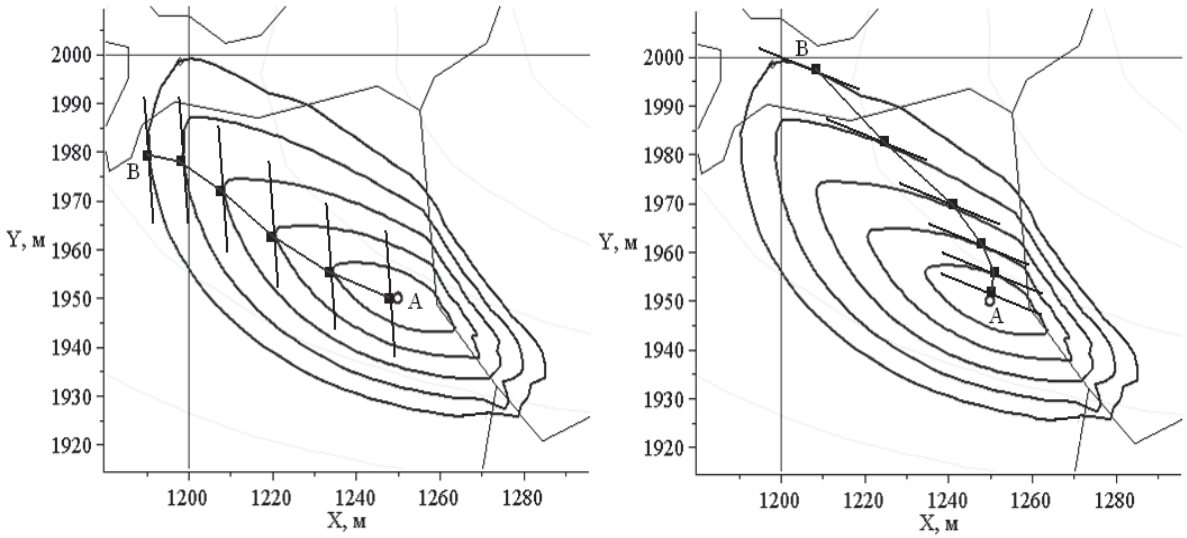


Рисунок 14 – Приклади побудування оптимальних маршрутів по пересіченій лісовій місцевості для пожежної автоцистерни АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364, з точки зору його безпеки та часу його долання

Отже, використовуючи розроблений алгоритм було побудовано оптимальні маршрути по пересіченій лісовій місцевості для пожежної автоцистерни АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364, з точки зору його безпеки та часу його долання.

На основі проведених досліджень, можна зробити наступні висновки.

Висновки. У результаті проведених досліджень була розв'язана задача виявлення закономірностей флуктуації центра мас цистерни із водою у залежності від швидкості автоцистерни при її русі лісовою пересіченою місцевістю та рівня її заповнення. При цьому отримані такі основні результати.

1. Проаналізовано конструкцію цистерни для води пожежного автомобіля АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364 на основі цього були сформульовані основні положення для побудування математичної моделі з дослідження флуктуацій центра мас цистерни із водою у залежності від швидкості даного автомобіля при його русі лісовою пересіченою місцевістю.

2. Побудовано математичну модель моделі з дослідження флуктуацій центра мас цистерни із водою у залежності від швидкості пожежного автомобіля АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364 при його русі лісовою пересіченою місцевістю на основі використання методу гідродинаміки згладжених частинок SPH (Smoothed Particles Hydrodynamic).

3. Розроблена методика моделювання впливу рельєфу поверхні лісової пересіченої місцевості на флуктуації центра мас цистерни із водою у залежності від швидкості пожежного автомобіля АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364 при його русі цією місцевістю.

4. У результаті розрахунку виявлено, що найбільшого впливу зазнають флуктуації центра мас цистерни із водою у залежності від швидкості пожежного автомобіля АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364 при його русі цією місцевістю від рівня заповнення цистерни. Найбільші флуктуації спостерігалися при заповненні цистерни на 25 %. Виявлено, що швидкість руху пожежного автомобіля АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364 впливає у меншій мірі на флуктуації центра мас цистерни із водою і найбільший впив спостерігався при максимально можливій швидкості руху автоцистерни 6 км/год.

5. За отриманими результатами повного факторного експерименту виявлено закономірність зміни максимального зміщення центра мас цистерни із водою у залежності від швидкості (v, км/год) пожежної автоцистерни АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364 при її русі лісовою пересіченою місцевістю та рівня заповнення цистерни (V, %) у вигляді регресійної залежності $y = 192.75 + 1.23 \cdot V - 21.625 \cdot v - 0.105 \cdot V \cdot v$.

6. З використанням виявлених закономірностей розроблена математична модель безпечної та оптимальної логістики для пожежних автоцистерн під час гасіння лісових пожеж, що дозволила побудувати безпечні та найменш тривалі за часом маршрути пожежної автоцистерни АЦ-4,5-60 (TGM 12.240)-364.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Nyzhnyk V. V., Tarasenko O. A., Kyrychenko O. V., Kosiarum, S. O., Pozdieiev S. V. The criteria of estimating risks of spreading fire to adjacent building facilities. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 708, p.p. 99–110, Kharkiv, (2019). https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012064

2. Pozdieiev S., Tarasenko O., Almazov K., Nekora V. Research of Dynamic Process in Water Cistern of Fire Automobile During Its Moving Along Rough Woodland. Mechanisms and Machine Science, 2023, 125 MMS, с. 1216–1223. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15758-5_125

3. Вікович І.А., Лаврівський М.З., Зінько Р.В. В 11 Теорія, адаптування та застосування пожежних автомобілів для ліквідації надзвичайних ситуацій: Монографія. – Львів: Растр-7, 2020. – 242 с.

4. Коба К.М. Моделі і методи розв'язання задач маршрутизації при ліквідації наслідків техногенних аварій: дис. канд. техн. наук: 01.05.02. Харків, 2005. 160 с.

5. Абрамов Ю.А. Моделювання пожеж, їх виявлення, локалізація та гасіння / Ю.А. Абрамов, А.Є. Басманов, О.А. Тарасенко. – Харків: НУЦЗУ, 2011. – 972 с.

6. S. Nicolici and R.M. Bilegan, Fluid structure interaction modeling of liquid sloshing phenomena in flexible tanks. Nuclear Engineering and Design. Vol 258, p.p. 51– 56. (2013).

7. I. Zisis et al. «SPH for shocks through inhomogeneous media». In: GDRI-IFS Conference on SPH and Particular Methods for: Fluids and Fluid Structure Interaction, January 2015 Lille University (FRANCE). 2015.

8. LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation: California, USA. (2014). (revision: 4778).

9. Куценко Л.М. Методи геометричного моделювання в задачах пожежної безпеки / Л.М. Куценко, С.В. Бобов, С.В. Росоха. – Харків: Академія цивільного захисту України, 2004. – 175 с.

10. Sammy G. Shina. Industrial design of experiments : a case study approach for design and process optimization. Springer, Cham, 2022.

11. Theodore T. Allen. Introduction to engineering statistics and Lean Six Sigma : statistical quality control and design of experiments and systems. Springer, London, England, 2019.

12. Ю.А. Абрамов, О.А. Тарасенко. Пошук області заборони під час моделювання маршруту в умовах гірського бездоріжжя. Вісник ХНАДУ. – 2009. Вип. 45. С. 44–46.

REFERENCES

1. Nyzhnyk V. V., Tarasenko O. A., Kyrychenko O. V., Kosiarum, S. O., Pozdieiev S. V. The criteria of estimating risks of spreading fire to adjacent building facilities. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 708, p.p. 99–110, Kharkiv, (2019). https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/708/1/012064

2. Pozdieiev S., Tarasenko O., Almazov K., Nekora V. Research of Dynamic Process in Water Cistern of Fire Automobile During Its Moving Along Rough Woodland. Mechanisms and Machine Science, 2023, 125 MMS, с. 1216–1223. https://doi.org/10.1007/978-3-031-15758-5_125

3. Vikovych I.A., Lavrivskyy M.Z., Zinko R.V. V 11 Teoriya, adaptuvannya ta zastosuvannya pozhezhnykh avtomobiliv dlya likvidatsiyi nadzvychaynykh sytuatsiy: Monohrafiya. – Lviv: Rastr-7, 2020. – 242 p.

4. Koba K.M. Modeli i metody rozvyazannya zadach marshrutyzatsiyi pry likvidatsiyi naslidkiv tekhnohennykh avariy: dys. kand. tekhn. nauk: 01.05.02. Kharkiv, 2005. 160 s.

5. Abramov YU.A. Modelyrovanye pozharov, ykh obnaruzhenyya, lokalyzatsyy y tushenyya / YU.A. Abramov, A.E. Basmanov, A.A. Tarasenko. – Kharkov: NUHZU, 2011. – 972s.

6. S. Nicolici and R.M. Bilegan, Fluid structure interaction modeling of liquid sloshing phenomena in flexible tanks. Nuclear Engineering and Design. Vol 258, p.p. 51– 56. (2013).

7. I. Zisis et al. «SPH for shocks through inhomogeneous media». In: GDRI-IFS Conference on SPH and Particular Methods for : Fluids and Fluid Structure Interaction, January 2015 Lille University (FRANCE). 2015.

8. LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corporation: California, USA. (2014). (revision: 4778).

9. Kutsenko L.M. Metody heometrychnoho modelyuvannya v zadachakh pozhezhnoyi bezpeky / L.M. Kutsenko, S.V. Bobov, S.V. Rosokha. – Kharkiv: Akademiya tsyvilnoho zakhystu Ukrayiny, 2004. – 175 p.

10. Sammy G. Shina. Industrial design of experiments: a case study approach for design and process optimization. Springer, Cham, 2022.

11. Theodore T. Allen. Introduction to engineering statistics and Lean Six Sigma: statistical quality control and design of experiments and systems. Springer, London, England, 2019.

12. Yu.A. Abramov, A.A. Tarasenko. Poisk oblasti zapreta pri modelirovanii marshruta v usloviyakh goristogo bezdorozhya. Vestnik KHNADU. - 2009. Vyp. 45. PP. 44-46.

Kamran ALMAZOV

Academy of the Ministry of Emergency Situations, Baku, Azerbaijan

ROLL-OVER RISK ASSESSMENT OF A FIRE TANKER IN UNEVEN FOREST TERRAIN

This paper presents the results of a study on the dynamic processes occurring in a fire truck tank with various water fill levels. The aim of the study is to obtain data on the fluctuation of the center of mass in the dynamic system formed by the water-filled tank of a fire truck moving across uneven forest terrain at different speeds. The obtained data make it possible to predict the risk of the fire truck overturning.

To solve the problem, a mathematical model of the fire truck and its water tank was developed using the LS-DYNA software package for dynamic system modeling. To simulate the dynamic effect of uneven forest terrain on the water tank, time-dependent angular displacements of the tank were determined. These angular values were used as boundary conditions to simulate the terrain's dynamic impact. The tilt angles of the fire truck's water tank were determined based on terrain irregularities, whose geometry was generated using a pseudorandom number generator.

By applying the explicit method of integrating dynamic equations implemented in LS-DYNA, patterns of center of mass fluctuation of the water tank were identified depending on the fill level and vehicle speed. Based on the modeling results, a mathematical model was developed to determine the optimal route of the fire truck to maintain its stability.

Keywords: *fire tanker, uneven forest terrain, center of mass fluctuation, smoothed particle hydrodynamics method, rollover risk, optimal route model.*