

Ларін О.О., Потопальська К.Є.
Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

МОДЕЛЮВАННЯ КОЛИВАНЬ ДВОВІСНОЇ АВТОЦИСТЕРНИ ПРИ ПЕРЕЇЗДІ ЧЕРЕЗ ОДИНИЧНУ НЕРІВНІСТЬ

У роботі виконується комп'ютерне моделювання коливань напівпричепу автоцистерни при переїзді через одиничну нерівність, яка моделюється як імпульс зовнішньої сили, що діє на вісі напівпричепу з урахуванням запізнення його дії у часі. Дослідження проводилося на основі тривимірного скінчено-елементного моделювання з явним інтегруванням у часі рівнянь динаміки. Для вивчення коливань було створено параметричну скінченно-елементну модель, яка дозволила провести серію варіативних розрахунків із наявністю та відсутністю внутрішніх жорсткісних елементів. Проведено порівняльний аналіз коливань в різних точках конструкції, що дозволив відстежити вплив внутрішніх жорсткісних елементів (хвилерізів) на динаміку коливань порожньої автоцистерни.

Ключові слова: автоцистерна, транспортний засіб, імпульсивне навантаження, одинична нерівність.

Постановка проблеми. У сучасних умовах питанням перевезення рідких нафтопродуктів приділяється багато уваги. При постійному зростанні кількості перевезень, стає гостре питання щодо безпечності та своєчасності вирішення логістичних проблем. Пошкодження цистерни, що здатні з'являтися під час експлуатації внаслідок накопичення та розвитку втоми призводять до виникнення тріщин та розгерметизації котла цистерни. Несвоєчасне виявлення таких пошкоджень конструкції може призвести до надзвичайної аварійно-небезпечної ситуації. Тому питанням розрахунків конструкцій транспортних засобів, що призначені для перевезення нафтопродуктів, з точки зору надійності їх елементів необхідно приділяти велику увагу. Особливо гостро ця проблема постає при проектуванні, оцінці тягових і швидкісних показників, загальної динаміки, прохідності, стійкості руху та плавності ходу, що тісно пов'язані з вертикальними коливаннями автоцистерни. Отже, розвиток методів розрахункового моделювання конструкцій цистерн для оцінки їх міцності як на стадії проектування, так і в умовах експлуатації з метою забезпечення безпечної роботи є актуальним. Аналіз пошкоджень базується на визначенні параметрів напружено-деформованого стану (НДС) конструкції при її експлуатації.

В сучасній технічній літературі приділяється багато уваги питанням дослідження працездатності елементів конструкції великогабаритних транспортних засобів [1-11]. Більшість робіт поділяється на дві групи. До першої групи слід віднести дослідження динаміки транспортних засобів (ТЗ) на спрощених моделях. До другої відносяться дослідження в яких представлено скінченно-елементне (СЕ) моделювання коливань відповідних ТЗ.

В роботах [7-11] проводиться аналіз коливань ТЗ, у яких модель представлена у вигляді зосереджених мас і жорсткостей, що їх зв'язують. У статті [11] описується метод аналізу вібрацій ТЗ методом псевдо збуджень. У роботі [9] проведено аналіз чутливості та надійності за різними критеріями: перекидання і злам транспортного засобу. Розглядається надійність при раптових відмовах шарнірно сполучених трактора і тривісного напівпричепу. Збурення задається у вигляді вектора випадкових параметрів. Результати аналізу надійності отримані у вигляді графіка імовірності відмови по відношенню до початкової швидкості. При цьому, з огляду на те, що використовувалася спрощена модель ТЗ, у вигляді зосереджених мас і жорсткостей, це не дозволило дослідити внутрішні деформації та напруження.

Відповідна проблема вирішується визначенням динамічного НДС елементів конструкції в експлуатації, застосовуючи для цього СЕ моделі [1-6]. Розглянуті в роботах моделі є вузько спеціалізованими, а результати придатні для оцінки НДС лише конкретних типів та моделей транспортних засобів. Проте підходи та загальні висновки й рекомендації є значно більш загальними та співпадають із задачами та метою даної статті.

Крім того, проведений аналіз робіт [1-6], дозволяє стверджувати, що в зазначених роботах недостатньо уваги приділено визначенню параметрів міцності конструкцій напівпричепів автоцистерн безрамного типу. В цьому сенсі заслуговує на увагу робота [4] представлено підхід до оцінки надійності залізничних цистерн. Виконано аналіз НДС циліндричної оболонки та еліптичних

днищ котла залізничної цистерни при статичному навантаженні та залишкових деформацій котла залізничної цистерни від пошкоджень типу «вм'ятина» з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) і проведено оцінку надійності її елементів при відмовах багато циклової втоми. Але автори обмежились лише аналізом міцності у детермінованій постановці в припущенні гармонічного навантаження, яке відповідає умовам стаціонарного руху.

Взагалі слід відмітити те, що зазвичай автори досліджень недостатньо уваги приділяють питанням адекватності завдання зовнішнього навантаження. Так, у більшості робіт навантаження задається або детермінованим, або у вигляді шуму, при цьому не враховується, що багатовісні колісні ТЗ мають залежний вплив на свої осі. Дійсно навантаження, яке діє на передню вісь автомобіля під час цього руху є таким самим як і навантаження на задню вісь але воно діє із запізненням на час проходження ТЗ шляху між цими осями. Також мало уваги приділяється нестационарним режимам руху ТЗ (різкі зупинки, аварійні ситуації, подолання дорожніх перешкод тощо). Разом із тим автоцистерна може зазнавати великі динамічні перенавантаження на нестационарних режимах, особливо при переїзді через одиничні нерівності (бордюр, лежачого поліцейського, ями та ін.). Тому дослідження особливостей такого руху має своє окреме важливе та актуальне значення.

У зв'язку з цим **метою даної роботи** є проведення дослідження нестационарних коливань напівпричепу автоцистерни, що виникають при переїзді через одиничну нерівність та визначення впливу на характеристики цих коливань наявності елементів додаткової жорсткості (хвилерізів).

Результати досліджень. Напівпричіп складається зі зовнішньої оболонки, внутрішніх хвилерізів, глухих перегородок, люків та опор. Креслення конструкції представлено на рис.1. Напівпричіп має наступні базові розміри: корпус еліптичної форми (менший радіус – 0,964 м, більший – 1,244 м), довжина корпусу цистерни – 11,435 м, висота еліптичних днищ – 0,288 м, товщина стінок прийнята однакова для усієї конструкції (10 мм). Матеріалом є сталь 09Г2С з наступними механічними властивостями: $[\sigma_T]=178.5$ МПа, модуль пружності $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па, щільність $\rho = 7850$ кг/м³, коефіцієнт Пуассона $\mu = 0.21$.

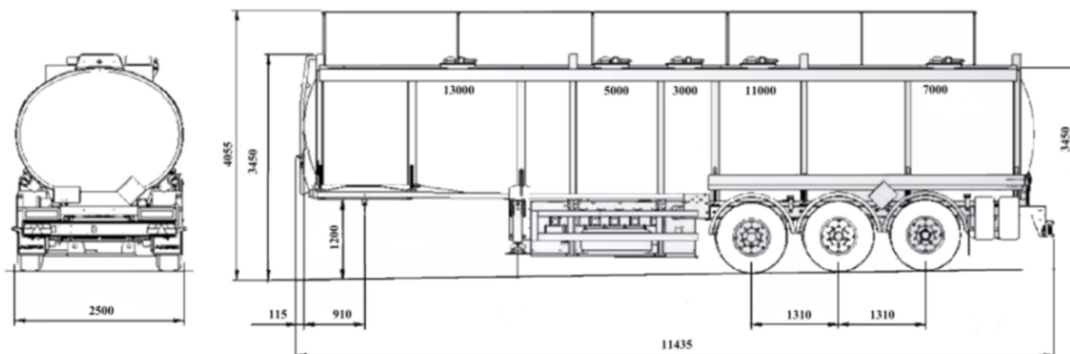


Рис.1 – Креслення напівпричепу автоцистерни [12]

При моделюванні переїзду через одиничну нерівність використовувалась скінченно-елементна модель, яка складається з основного корпусу, опор та ресор на які приводиться навантаження (рис.2).

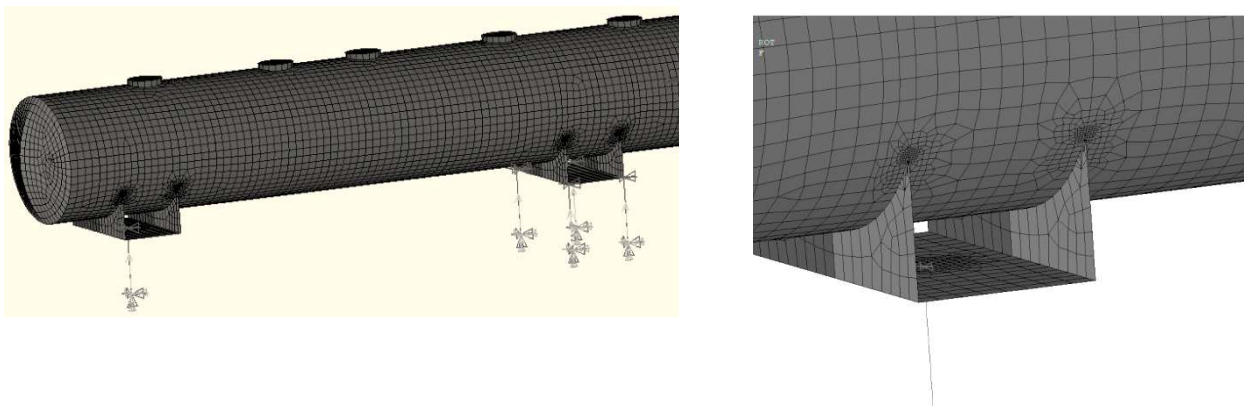


Рис.2. SE-модель

Область стику опори та основного корпусу є типовим концентратором напружень, тому запропоновано згустити SE-сітку у цьому місті. Це можна бачити на рис.2.

При розрахунку коливань автоцистерни змодельований випадок – переїзд через одиничну нерівність, дія якої на колеса носить ударний характер (імпульс зовнішньої сили). При цьому враховано, що при русі через одиничну нерівність автоцистерна відчуває навантаження на вісі не одночасно, а з запізненням у часі, яке залежить від міжосьової довжини (L_s) та швидкості руху (v). Тому навантаження приводилось на ресори у вигляді зображеному на рис. 3.

При дослідженні коливальних процесів, що виникають при переїзді однієї нерівності, приймаємо, що початкові умови в момент наїзду на нерівність відомі і є тривіальними однорідними.

Рівняння руху автоцистерни можна компактно записати в матричній формі відносно вектора узагальнених переміщень $\{z\}$:

$$[M] \cdot \{\ddot{z}\} + [K] \cdot \{\dot{z}\} + [C] \cdot \{z\} = \{f\}, \quad (1)$$

де $[M]$, $[K]$, $[C]$ – матриці узагальнених мас, коефіцієнтів демпфування та пружності відповідно; $\{f\}$ – вектор-стовпчик узагальнених сил. Зовнішня сила прикладається у вигляді імпульсивного навантаження.

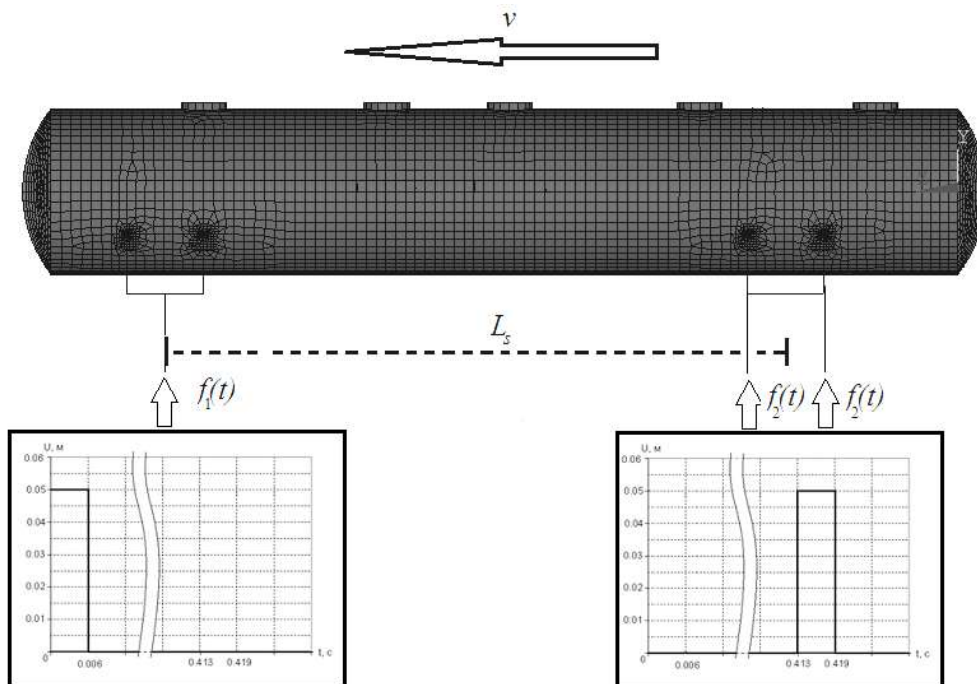


Рис. 3 Графік прикладання навантаження з урахуванням запізнення у часі

При дослідженні було проведено два розрахунки з усіма хвилерізами та без них (рис.4). Розрахунки проводилися при швидкості 60 км/год. Приведені графіки переміщень (рис.5) та напружень (рис.6) на лівому краю цистерни та на правому краю цистерни для двох розрахункових моделей.

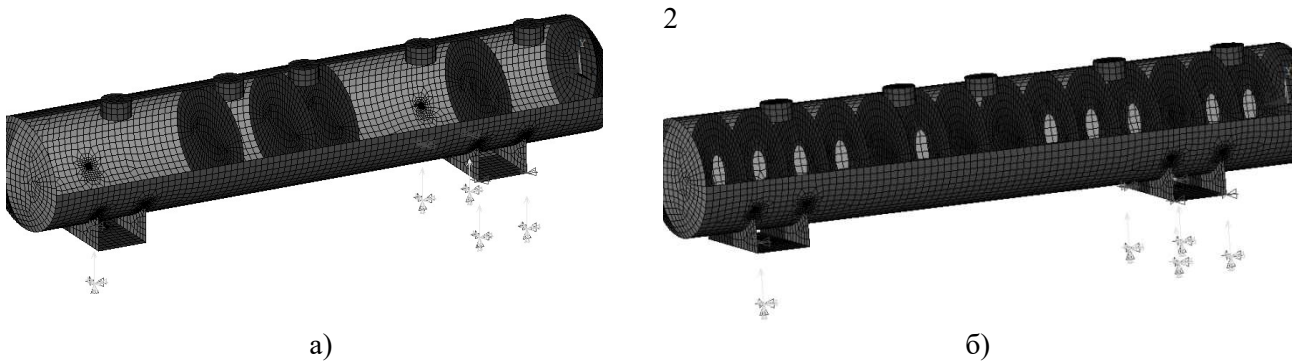


Рис.4 Розрахункові моделі а) без внутрішніх хвилерізів та б) з внутрішніми хвилерізами

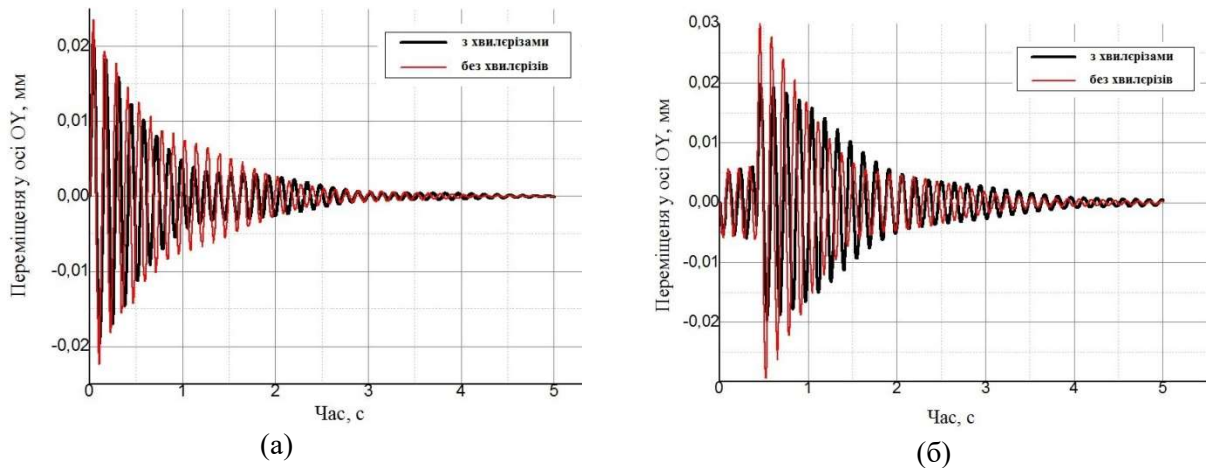


Рис. 5 Графік переміщень на лівому краю (а) та на правому краю (б) цистерни

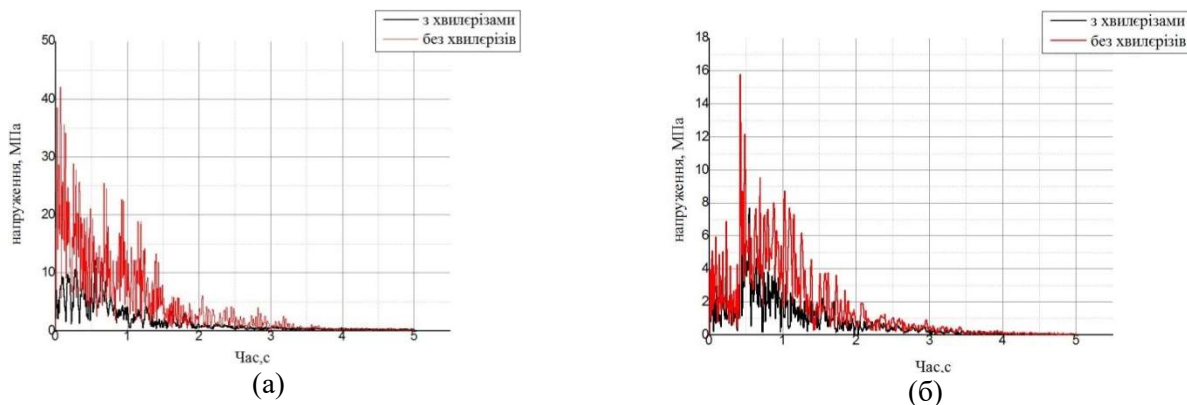


Рис. 6 Графік напруження на лівому краю (а) та на правому краю (б) цистерни

Коливання напівпричепу мають пульсуючий характер. На лівому краю напівпричепу максимальна амплітуда переміщень спостерігається на початку руху і дорівнює 2 мм у обох випадках (рис.5). З графіків на рис 5 можна побачити, що наявність хвилерізів впливає на амплітуду коливань лівого краю цистерни, тобто амплітуда збільшується на другому відрізку. При наявності хвилерізів гасіння коливань від дії навантаження на першу вісь відбувається протягом першої секунди, а потім спостерігається незначний зріст амплітуди переміщень, який досягає максимального значення на другій секунді, з подальшим пульсуючим затуханням. У випадку відсутності хвилерізів швидкість затухання суттєво менша ніж у попередньому випадку, крім того амплітуда більша у два рази.

З іншого боку, вплив на правий край напівпричепу не такій явний, лише на початку руху при наявності хвилерізів спостерігається збільшення максимальної амплітуди переміщень на 40%. У даному випадку коливання не мають явного пульсуючого характеру.

При аналізі графіків напружень визначено, що вплив внутрішніх хвилерізів значний. Так, на лівому краю максимальні амплітуди більші у 4 рази, а на правому краю у два рази в порівнянні з конструкцією що має хвилерізи. Також при відсутності хвилерізів спостерігається більша неоднорідність концентрації напружень і на лівому краю виникають напруження більше у 2.5 рази ніж на правому краю. У обох випадках гасіння коливань цистерни відбувається на 4 секунді. Напруження нестационарний коливальний характер з досить високою частотою (вібропереміщення проявлялись на значно нижчій частоті)

Висновки. У даній роботі побудована параметрична модель напівпричепу автоцистерни. Дослідженні коливання конструкції під дією імпульсивного навантаження при наявності хвилерізів та без них. Визначено, що вплив хвилерізів більший на лівому краю напівпричепу у два рази. На правому краю максимальна амплітуда коливань збільшується на 40% при відсутності хвилерізів. Також визначено, що виникаючі напруження більші у 4 рази на лівому краю цистерни.

1. Аврамов М.В. Разработка метода расчета несущих систем колесных машин при случайных стационарных колебаниях / М.В Аврамов — Саратов : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец 01.02.06. «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры», 2009. — 17 с.
2. Галимянов И.Д. Оценка усталостной долговечности кабин грузовых автомобилей расчетно–экспериментальным методом / И. Д. Галимянов. — Набережные Челны : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.05.03 «Колесные и гусеничные машины», 2009. — 16 с.
3. D. Younesian Fatigue life estimation of MD36 and MD523 bogies based on damage accumulation and random theory / D. Younesian, A. Solhmirzaei, A. Gachloo. // *Journal of Mechanical science and technology*, 2011. — 9 с.
4. Шостак Р.М. Ризики виникнення пожеж під час експлуатації залізничних цистерн з пошкодженнями типу «вмятина» / Р.М. Шостак. — Київ : автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 21.06.02 — «пожежна безпека», 2012. — 23 с.
5. Мясницкий Р.Н. Разработка расчетных моделей и методов оценки работоспособности цистерн несущей конструкции / Мясницкий Р. Н. — М. : дис. кандидата тех. наук 05.05.04, 2009. — 173 с
6. A.V.Hougaz Probabilistic Structural Analysis Applied To Spring Leaf Suspension Assembly Of Semi-Trailer Tank Vehicle / A.V.Hougaz, C.A.N. Dias. // *San Pauls :17th International Congress of Mechanical Engineering*, 2003. — 8 с.
7. Milan Saga Simulation Of Vertical Vehicle Non-Stationary Random Vibrations Considering Various Speeds / Milan Saga, Lenka Jakubovichova. // *Transport z.84*, 2014. — 6 с.
8. J.Dai Random displacement and acceleration responses of vehicles with uncertainty / J.Dai, W.Gao, N. Zhang. // *Journal of Mechanical science and technology*, 2011. — 8 с. 9. H. Badi Sensitivity and reliability analysis of articulated heavy vehicle / H. Badi, F.Bernardin, M. Bouteldja, M. Fogli, C.H. Lamarque. // *Leuven, Belgium Eurodyn*, 2011. — 9 с.
10. V. Rouillard On the Non-Gaussian Nature of random vehicle vibrations / V. Rouillard. // *Progressing of the world congress on engineering Vol II, London U.K.*, 2007. — 6 с.
11. Li-Xin Guo Vehacle Vibration Analysis in changeable speeds solved by pseudoexcitation / Li-Xin Guo, Li-Ping Zhang. // *Mathematical Problems in Engineering.*, 2009. — 9 с.
12. Ричардс Р.Б. Метод конечных элементов в теории оболочек и пластин / Ричардс Р.Б. — Р. «Зинатне», 1988. — 282 с.

REFERENCES

1. Avramov, M. (2009). *Development of a method for calculating bearing systems-wheeled vehicles with stationary random vibrations*. Saratov, 17 p.
2. Galimyanov, I. (2009). *Assessment of fatigue life truck cabins of methods to assess*. Naberezhnye Chelny, 16 p.
3. Younesian, D. Solhmirzaei, A. Gachloo A. (2011). Fatigue life estimation of MD36 and MD523 bogies based on damage accumulation and random theory. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 9 p.
4. Shostak, R. (2012). *Risk of fire during the operation of railway tanks with injuries such as "dent"*. Kyiv, 23 p.
5. Myasnitskiy, R. (2009). *The development of computational models and methods for assessing performance tank support structure*. Moscow, 173 p.
6. Hougaz, A.B., Dias C.A.N. (2003). Probabilistic Structural Analysis Applied To Spring Leaf Suspension Assembly Of Semi-Trailer Tank Vehicle. *Sas Pauls: 17th International Congress of Mechanical Engineering*, 8 p.
7. Milan Saga, Lenka Jakubovichova. (2014). Simulation Of Vertical Vehicle Non-Stationary Random Vibrations Considering Various Speeds. *Transport*, no.84, 6 p.
8. J.Dai, W.Gao, N. Zhang. (2011). Random displacement and acceleration responses of vehicles with uncertainty. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 8 p.
9. Badi, H., Bernardin, F., Bouteldja, M., Fogli, M. & Lamarque, C.H. (2011). Sensitivity and reliability analysis of articulated heavy vehicle. *Leuven, Belgium Eurodyn*, 9 p.
10. Rouillard, V. (2007). On the Non-Gaussian Nature of random vehicle vibrations. *Progressing of the world congress on engineering*, Vol II, London, U.K., 6 p.
11. Li-Xin Guo, Li-Ping Zhang. (2009). Vehacle Vibration Analysis in changeable speeds solved by pseudoexcitation. *Mathematical Problems in Engineering*, 9 p.
12. Richards, R.B. (1988). *The finite element method in the theory of shells and plates*. Riga, 282 p.

Ларін А.А., Потопальська К.Є. Моделирование колебаний двуосной автоцистерны при переезде через единичную неровность

В работе выполняется компьютерное моделирование колебаний полуприцепа автоцистерны при переезде через единичную неровность, которая моделируется как импульс внешней силы, действующей на оси полуприцепа с учетом запаздывания его действия во времени. Моделирование проводилось на основе трехмерного конечно-элементного моделирования с явным интегрированием во времени уравнений динамики. Для исследования колебаний была создана параметрическая конечно-элементная модель, которая позволила провести серию вариативных расчетов с наличием и отсутствием внутренних жесткостных элементов. Проведен сравнительный анализ колебаний в различных точках конструкции, позволивший отследить влияние внутренних жесткостных элементов (волнорезов) на динамику колебаний пустой автоцистерны.

Ключевые слова: автоцистерна, транспортное средство, импульсивное нагружки, единичная неровность.

O. Larin, K. Potopalska. The simulation vibration of two-axle semi-trailer tank vehicle when driving across single unevenness

In this paper is carried out computer simulations of a tanker semi-trailer vibration when moving through a unit unevenness, which is modeled as an impulse of the external force acting on the semi-trailer axle with time lag. The simulation was performed on the basis of three-dimensional finite element modeling with explicit integration of dynamic equations of time. To investigate the vibrations parametric finite element model was created, which allowed a series of variant calculations with and without internal stiffness elements. A comparative analysis of vibrations at different points in the structure allowed to track the influence of internal stiffness elements (breakwaters) on the dynamics of vibrations empty tanker.

Keywords: semi-trailer tank vehicle, vehicle, impulse load, single unevenness.

АВТОРИ:

ЛАРИН Олексій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри «Динаміка та міцність машин», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», e-mail: alexeya.larin@gmail.com

ПОТОПАЛЬСЬКА Ксенія Євгенівна, аспірант кафедри «Динаміка та міцність машин», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», e-mail: ks.potopalskaya@gmail.com

АВТОРЫ:

ЛАРИН Алексей Александрович, к. т. н., доцент кафедри «Динамика и прочность машин», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», e-mail: alexeya.larin@gmail.com

ПОТОПАЛЬСКАЯ Ксения Евгеньвна, аспирант кафедры «Динамика и прочность машин», Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», e-mail: ks.potopalskaya@gmail.com

AUTHORS:

Olexey LARIN, PhD. in Engineering, Assoc. Professor of dynamics and strength of machines Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", e-mail: alexeya.larin@gmail.com

Kseniia POTOPALSKA, Master, Ph.D student; Dynamics and strength of machines department of the National Technical University «KPI», e-mail: ks.potopalskaya@gmail.com

Стаття надійшла в редакцію 08.02.2016р.