

УДК 621.01
UDC 621.01

ОБҐРУНТУВАННЯ СПРОЩЕНОГО АНАЛІТИЧНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ВЕЛИЧИНИ ГОРИЗОНТАЛЬНОЇ СИЛИ УДАРУ РІДИНИ ОБ СТІНКИ РУХОМОЇ ПРЯМОКУТНОЇ ЄМКОСТІ

Вікович І.А., доктор технічних наук, Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна, wиковigor@gmail.com.ua, Author ID: 48862001000

Дмитриченко М.Ф., доктор технічних наук, Національний транспортний університет, Київ, Україна, dmitrichenko@ntu.edu.ua, orcid.org/0000-0003-4223-1838

ARGUMENTATION OF SIMPLIFIED ANALYTICAL METHOD DETERMINATION VALUE OF HORIZONTAL OF FORCE HIT OF FLUID A WALL MOTION ORTHOGONAL OF CAPACITY

Vikovoch I.A., doktor technical sciences, Nationaly university «Lvivska politechnika», wиковigor@gmail.com.ua, Author ID: 48862001000

Dmytrychenko M.F., Doctor of Technical Sciences, National Transport University, Kyiv, Ukraine, dmitrichenko@ntu.edu.ua, orcid.org/0000-0003-4223-1838

ОБОСНОВАНИЕ УПРОШЕННОГО АНАЛИТИЧЕСКОГО МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ СИЛЫ УДАРА ЖИДКОСТИ О СТЕНКИ ПДВИЖНОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ЕМКОСТИ

Викович И.А., доктор технических наук, Национальный университет «Львовская политехника», Львов, Украина, wиковigor@gmail.com.ua, wиковigor@gmail.com.ua, Author ID: 48862001000

Дмитриченко Н.Ф., доктор технических наук, Национальный транспортный университет, Киев, Украина, dmitrichenko@ntu.edu.ua, orcid.org/0000-0003-4223-1838

Постановка проблеми та аналіз останніх досліджень і публікацій.

На плавність ходу і стійкість руху автоцистерн, частково заповненими рідиною, значно впливає рухливість рідини.

Наявність вільної поверхні рідини при частковому заповненні цистерни істотно ускладнює задачу складання і дослідження рівнянь руху загалом автоцистерни, так як з'являється додатково нескінчене число ступенів вільності, пов'язаних із хвилювими рухами рідини.

Досліджували задачі динаміки ємкостей, частково заповненими рідиною Дж. Стокс, Гемгольц, Нейман, Г. Ламб, Н.Е. Жуковский [5], Г.С., Наріманов [10], В.І. Столбенцев [12], Л.І. Сретенський, Д.Е. Охцімський, А.Н. Філатов [13], П.І. Горьков, Л.Г. Бояршина [1], В.Н. Тіщенко, Ю.А. Шевляков, В.В. Румянцев, С.Ф. Фещенко, Л.В. Докучаєв, Б.Л. Кулаковський, Ю.М. Черкашин і багато інших зарубіжних дослідників.

Докладно висвітлені питання стосовно задач динаміки тіл, що мають ємкості, частково заповнені рідиною, у монографіях І.О. Луковського, М.Я. Барняка, А.Н. Комаренка [6], Г.Н. Мікішева[8], Б.І. Рабіновича[11], Н.Н. Мойсеєва[9], А.А. Петрова, Л.Ф. Черноуська, І.Б. Богоряда, Г.І. Богомаза [2], Г.Н. Абрамсона.

Для дослідження коливань рідини в ємностях, частково заповнених рідиною, використовують переважно головні рівняння гідродинаміки: рівняння Ейлера і рівняння нерозривності. Переважно рівняння руху рідини записують у формі Громеки - Ламба.

Для розв'язування крайових задач гідродинаміки, пов'язаних із ємкостями, частково заповнених рідиною, переважно застосовують потенціал швидкостей або пришвидшень чи потенціал зміщень і одержують інтеграл Коші – Лагранжа. Визначають частоти і форми коливань рідини та гідродинамічні коефіцієнти, сили і моменти.

Розв'язування конкретної такої крайової задачі гідродинаміки і знаходження потенціалу швидкостей, пов'язані з необхідністю записування відповідних кінематичних та динамічних граничних умов на змоченій поверхні ємкості і на вільній поверхні хвилі рідини.

Такі питання докладно висвітлені у монографіях Мікішева Г.Н. [8], Мойсеєва Н.Н.[9], Луковського І.О.[6,7]. Не дивлячись на те, що у цих монографіях прийняті певні припущення (рідина вважається ідеальною, нестисливою, переважно не враховується її в'язкість) їх математичний апарат

є доволі складний і тому надто важко застосувати цю теорію до розрахунків плавності ходу та стійкості руху транспортних засобів, які перевозять рідини, зокрема у разі їх часткового заповнення.

У роботі [10] вперше вдалось розробити методику складання нелінійних коливань рідини, частково заповнених циліндричних ємностей, а у роботі [12] були одержані рівняння руху, що описували плоскі і просторові коливання рідини в області головного резонансу у разі рухомої циліндричної і призматичної ємностей. Зокрема роботи [1,5,13] та інші присвячені коливанням рідини при горизонтальних рухах ємностей. Значно менше вивчені питання, що стосуються динаміки тіл, які мають ємності заповнені в'язкою рідиною. Ці задачі представляють більші труднощі ніж у разі дослідження ідеальної рідини. Дослідженню задач динаміки ємностей, частково заповнених в'язкою рідиною, присвячена монографія Л.Ф. Черноуська.

Виділення невіршених раніше частин загальної проблеми дослідження.

Під час розв'язування практичних задач динаміки тіл, що мають ємності, частково заповнені рідиною, найважливішим є визначення сил, що діють на корпус ємності транспортних засобів.

Врахування додаткових ступенів вільності рідини і пружності корпусу транспортних засобів зводиться до розв'язування доволі складних крайових задач математичної фізики. Складність розв'язування нелінійних крайових задач гідродинаміки обмеженого об'єму рідини з вільною поверхнею для рухомих ємностей полягають не тільки у тому, що крайові умови на вільній поверхні нелінійні, але у тому, що вільна поверхня невідома і, отже, область визначення потенціалу швидкостей рідини наперед невідома, крім цього границі області змінюються з часом. Проведені відомі дослідження та одержані результати аналітичних досліджень щодо динамічних процесів у рухомих ємностях, частково заповнених рідиною, із – за значної складності математичних викладок надзвичайно важко безпосередньо застосувати до вирішення проблеми стійкості руху та плавності ходу транспортних засобів, які перевозять різні рідини.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Переважно усі автори, які займаються дослідженням коливань рідини в ємностях, частково заповнених рідиною, вважають, що рідина, налита в ємність (рис.1), являє собою деякий резонатор (коливальну систему) і тому її рух у багатьох випадках подібний до коливання математичного маятника.

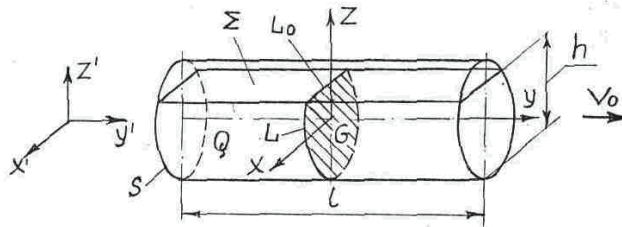


Рисунок 1 - Розрахункова схема коливань рідини у горизонтальній рухомій циліндричній ємності
Figure 1 - Estimated flow diagram of fluid fluctuations in a horizontal moving cylindrical tank

Введемо в розгляд абсолютну систему координат $ox'y'z'$ і систему координат $oxyz$, незмінно зв'язану з рухомою ємністю. Помістимо початок рухомої системи координат $oxyz$ у центр циліндра. Вісь oy направимо уздовж осі циліндра, а вісь oz - перпендикулярно до вільної поверхні Σ_0 . Такий вибір декартових координат доцільний у разі використання координатних функцій гармонічних поліномів. Покладемо радіус циліндра рівним r_0 і позначимо через l і h відповідно довжину і глибину рідини.

Для одержання рівнянь руху рідини в ємності, яка рухається, скористаємося варіаційним принципом Гамільтона-Остроградського в якому роль функції Лагранжа відіграє вираз

$$L = \int_Q \rho dQ = -\rho \int_{\Sigma_0} \left(\int_{h(x,z)}^{f(x,z,t)} \left[\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \Phi)^2 - \nabla \Phi (\vec{v}_0 + \vec{w} x \vec{r}) + u \right] dx \right) dS, \quad (1)$$

де ρ - масова густина рідини; Σ_0 - збурена вільна поверхня рідини; $h(x,z)$ - рівняння ємності, $\Phi(x,y,z,t)$ - потенціал швидкостей, які описують абсолютний рух рідини в рухомій системі координат; ∇ - оператор Гамільтона, \vec{v}_0 - вектор поступальної швидкості ємності; \vec{w} - вектор просторової миттєвої

кутової швидкості ϵ мкості; \vec{r} - вектор якої-небудь точки системи відносно точки 0; u – силова функція.

Відзначимо, що головна наша задача полягає у визначенні впливу рухливості рідини в ємкості транспортного засобу на його стійкість руху та плавність ходу.

Пропонуємо інженерний підхід щодо визначення горизонтальної гідродинамічної сили удару хвилі рідини до передньої чи задньої стінки прямокутної ємкості під час нерівномірного прямолінійного руху транспортного засобу [4].

В основу запропонованого методу, щодо аналізу коливань рідини у рухомій прямокутній ємкості, покладено енергетичний підхід.

Коливання рідини у прямокутній ємкості мобільної машини розглядається у вигляді одномасової коливальної системи твердого тіла.

Розглянемо визначення горизонтальної гідродинамічної сили удару хвилі рідини, з урахуванням її демпфування, об вертикальні стінки прямокутної ємкості, частково заповненої рідиною, машина якої переміщається нерівномірно по дорозі з пришвидшенням, що змінюється за деяким довільним періодичним законом (рис.2).

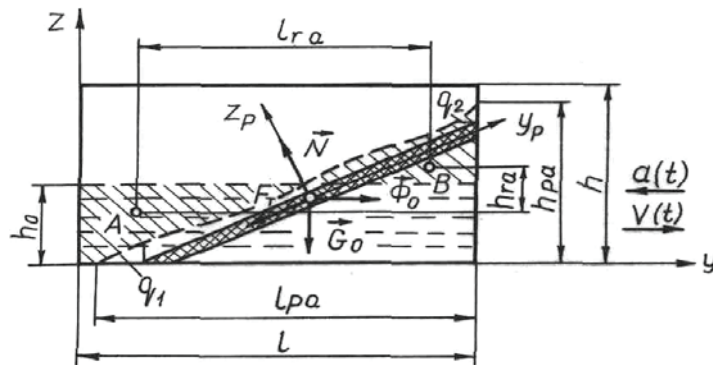


Рисунок 2 - Розрахункова схема коливань рідини з демпфуванням для визначення горизонтальної величини удару хвилі рідини об вертикальні стінки прямокутної ємкості машини, що рухається прямолінійно з пришвидшенням за довільним законом його зміни

Figure 2 - Estimated flow diagram of fluid fluctuations with damping to determine the horizontal magnitude of the impact of a liquid wave on the vertical wall of a rectangular capacity of a machine moving linearly with the acceleration under the arbitrary law of its change

Тут лінійні розміри ємкості: довжина l , ширина b і висота h , а висота рівня рідини у спокійному стані рівна h_0 .

При нерівномірному русі машини сили інерції зумовляють коливальний процес рідини в її ємкості. Нехай в деякий момент коливального процесу рівень рідини в ємкості буде нахилений під кутом α_p . При цьому максимальна висота рівня рідини стане h_p , а довжина його по горизонталі буде l_p . Допустимо надалі, що у випадку пришвидшеного або сповільненого руху ємкості переміщатись буде тільки частина рідини, що обмежена (при одиничному постійному поперечному перерізі) заштрихованою площею (рис.2). Ця частина рідини з центром ваги у точці A переміщається з лівої частини у праву (з центром ваги у точці B). При цьому центр ваги рідини, що переміщається переміститься по вертикалі на величину h_r і по горизонталі на l_r .

Значення h_r і l_r можна знайти використавши відомі залежності для визначення положення центра ваги складних площ і об'ємів:

$$l_r = l - \frac{1}{3} \left(h_p - \frac{h_0}{\operatorname{tg} \alpha_p} \right) - \frac{3(l - l_p)^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_p + h_0 [3(l - l_p) \cdot \operatorname{tg} \alpha_p + h_0]}{3[2(l - l_p) \cdot \operatorname{tg} \alpha_p + h_0] \cdot \operatorname{tg} \alpha_p}, \quad (2)$$

$$h_r = \frac{1}{3} (2h_0 + h_p) - \frac{3h_0(l - l_p) \cdot \operatorname{tg} \alpha_p + 2h_0^2}{3[2(l - l_p) \cdot \operatorname{tg} \alpha_p + h_0]}. \quad (3)$$

Вирази (2) і (3) справедливі при $l_p \leq l$ (розглядається випадок коли ємність наповнена рідиною до величини $h_0 \leq \frac{h}{2}$).

Виділимо деякий елемент (слій) рідини паралельний верхній грані рівня (рис.3). На цей слій вертикально діє сила ваги об'єму рідини, що опирається безпосередньо на дно ємності (трикутник з площею q_1). У горизонтальному напрямку діє інерційна сила $\Phi_0 = -m_0 a_e$, a_e – пришвидшення руху машини разом із прямокутною ємністю, заповненою рідиною, m_0 – маса об'єму всієї рідини, яка знаходиться вище елемента, за вирахуванням об'єму, який безпосередньо прилягає до стінок ємності (трикутник з площею q_2). Враховуючи, що $q_1 = q_2$ і, позначаючи нормальну реакцію рідини N , що знаходиться нижче елемента, складемо рівняння відносної рівноваги виділеного елемента (рис.2) у прямокутній ємності в проєкціях на осі y і z , що зв'язані із довільним горизонтальним рухом машини:

$$\begin{aligned} \Phi - N \sin \alpha_p - F_T \cos \alpha_p &= 0; \\ N \cos \alpha_p - F_T \sin \alpha_p - G_0 &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Прийmemo, що $F_T = \mu_r N$, де μ_r – коефіцієнт внутрішнього тертя рідини, який визначається експериментально відповідно до певного класу рідин. Тоді рівняння (4) з урахуванням величини $\Phi_0 = m'_0 a_e$ і $G_0 = m'_0 g$ подамо у вигляді:

$$\begin{aligned} m'_0 a_e &= N(\sin \alpha_p + \mu_r \cos \alpha_p), \\ m'_0 g &= N(\cos \alpha_p - \mu_r \sin \alpha_p). \end{aligned} \quad (5)$$

Звідки

$$\frac{a_e}{g} = \frac{\sin \alpha_p + \mu_r \cos \alpha_p}{\cos \alpha_p - \mu_r \sin \alpha_p}. \quad (6)$$

Позначимо чисельник і знаменник правої частини рівняння (6) у вигляді

$$\frac{a_e}{g} = \frac{\sqrt{1 + \mu_r^2} \sin(\alpha_p + \varphi)}{\sqrt{1 + \mu_r^2} \cos(\alpha_p + \varphi)}, \quad (7)$$

де $\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_r^2}}$, $\sin \varphi = \frac{\mu_r}{\sqrt{1 + \mu_r^2}}$. Отже, $\frac{a_e}{g} = \operatorname{tg}(\alpha_p + \varphi)$, де $\varphi = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \mu_r$ і тоді

$$\alpha_p = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{a_e}{g} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} \mu_r \quad (8)$$

Вважаючи як і раніше, об'єм рідини у рухомій прямокутній ємності незмінним при одиничній ширині ємності $\left(h_0 l = \frac{1}{2} l_p h_p \right)$ та беручи до уваги, що $h_p = l_p \operatorname{tg} \alpha_p$,

$$\alpha_p = \frac{h_p}{\operatorname{tg} \alpha_p}. \quad (9)$$

Значення h_p і l_p будуть:

$$l_p = \sqrt{\frac{gh_0 l}{\operatorname{tg} \alpha_p}}, \quad h_p = \sqrt{2h_0 l \operatorname{tg} \alpha_p}, \quad (10)$$

де α_p визначається виразами (8).

Спроектувавши сили на вісь z_p , $N - G_0 \cos \alpha_p - \Phi_0 \sin \alpha_p = 0$, знайдемо:

$$N = m_0'(g \cos \alpha_p - a_e \sin \alpha_p). \quad (11)$$

На основі енергетичного підходу складемо рівняння робіт у вигляді:

$$m_r g h_r = (\Phi_\mu - F_T \cos \alpha_p) l_r. \quad (12)$$

Визначимо Φ_μ із (12), враховуючи (11) і те, що $F_T = \mu_r N$, а також припускаючи, що $m_0' = m_r$, де m_r – маса частини рідини, яка переміщається в ємності внаслідок дії сил інерції Φ ,

$$m_r = \frac{(h_p - h_0)^2 b \gamma}{2 g t g \alpha_p}, \quad \gamma - \text{питома вага рідини.} \quad (13)$$

Уявимо собі силу Φ_μ як деякий опір переміщення рідини, який виникає від нуля до деякої певної величини. Відношення цієї сили до відносного переміщення рідини в ємності виразимо як деяку умовну жорсткість. Тобто

$$c_{p\mu\alpha} = \frac{\Phi_{\mu\alpha}}{l_{ra}}, \quad (14)$$

$$\Phi_{\mu\alpha} = m_{ra} \left[g \frac{h_r}{l_r} + \mu_r (g \cos \alpha_{pa} - a(t) \sin \alpha_{pa}) \right], \quad (15)$$

де $2\mu = \frac{\mu_r}{m_r}$, μ_r – коефіцієнт в'язкого тертя рідини, а m_r в загальному випадку визначається виразом (14).

Покладемо, що з моменту початку руху рідини, яка переміщається, сила Φ_μ зростає лінійно (так як на початку відносного руху рідини приймає участь тільки частина рідини, а відтак її маса збільшується). Складемо рівняння відносного руху рідини як твердого тіла під дією сили Φ_μ , що долає опір пружних сил.

Позначивши координату переміщення центра ваги рухомої частини рідини у прямокутній ємності по горизонталі через y_r запишемо диференціальне рівняння відносного руху рідини у ємності при поступальному руху ємності разом із машиною за деяким довільним періодичним законом у вигляді одномасової коливальної системи[3]. :

$$\ddot{y}_{r\mu\alpha} + 2\mu\dot{y}_{r\mu\alpha} + \omega_{r\mu\alpha}^2 y_{r\mu\alpha} = ma(t). \quad (16)$$

Позначимо $ma(t) = f(t)$ – періодичне кінематичне збудження з періодом τ . Розкладемо функцію $f(t)$ у скінченний чи нескінченний ряд Фур'є

$$f(t) = a_0 + \sum_{r_\mu=1}^{\infty} (a_{r_\mu} \sin r_\mu \omega t + b_{r_\mu} \cos r_\mu \omega t), \quad (17)$$

де
$$\omega = \frac{2\pi}{\tau}, \quad a_0 = \frac{1}{\tau} \int_0^\tau f(t) dt,$$

$$a_{r_\mu} = \frac{2}{\tau} \int_0^\tau f(t) \sin r_\mu \omega t dt, \quad b_{r_\mu} = \frac{2}{\tau} \int_0^\tau f(t) \cos r_\mu \omega t dt. \quad (18)$$

За допомогою перетворень, де $i = \sqrt{-1}$, ряд (17) приведемо до комплексної форми у вигляді

$$f(t) = \sum_{r_{\mu}=-\infty}^{+\infty} c_{r_{\mu}} e^{ir_{\mu}\omega t}, \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \sin r_{\mu}\omega t &= \frac{1}{2i}(e^{ir_{\mu}\omega t} - e^{-ir_{\mu}\omega t}), \\ \cos r_{\mu}\omega t &= \frac{1}{2}(e^{ir_{\mu}\omega t} + e^{-ir_{\mu}\omega t}), \end{aligned} \quad (20)$$

де

$$c_{r_{\mu}} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} f(t) e^{-ir_{\mu}\omega t} dt.$$

Рівняння (16) з урахуванням (19) буде

$$\ddot{y}_{r_{\mu a}} + 2\mu\dot{y}_{r_{\mu a}} + \omega_{r_{\mu a}}^2 y_{r_{\mu a}} = \sum_{r_{\mu}=-\infty}^{+\infty} c_{r_{\mu}} e^{-ir_{\mu}\omega t}. \quad (21)$$

Загальний розв'язок рівняння (21), використовуючи властивість лінійних диференціальних рівнянь, може бути одержаний як лінійна сума загального розв'язку однорідного рівняння $y_{r_{\mu}}^*$ і як сума часткових розв'язків $y_{r_{\mu}}^{**}$, що відповідає кожній окремій складовій правій частини рівняння (21):

$$y_{r_{\mu a}} = y_{r_{\mu a}}^* + y_{r_{\mu a}}^{**}. \quad (22)$$

Для $\mu < \omega_{r_{\mu a}}$ загальний розв'язок $y_{r_{\mu a}}^*$ однорідного рівняння (21) має вигляд

$$y_{r_{\mu}}^* = e^{-\mu t} (C_1 \cos \mu_1 t + C_2 \sin \mu_1 t), \quad \mu_1 = \sqrt{\omega_{r_{\mu}}^2 - \mu^2}. \quad (23)$$

Частковий розв'язок $y_{r_{\mu a}}^{**}$ цього рівняння будемо шукати у вигляді комплексного ряду

$$y_{r_{\mu a}}^{**} = \sum_{r_{\mu}=-\infty}^{+\infty} A_{r_{\mu a}} e^{ir_{\mu}\omega t}. \quad (24)$$

Використовуючи нульові початкові умови, знайдемо постійні інтегрування c_1 і c_2

Знайдемо швидкість центра маси рухомої частини рідини при її коливанні у прямокутній ємності та час впродовж якого горизонтальна гідродинамічна сила удару хвилі рідини об стінки рухомої прямокутної ємності набуде максимального значення під час нерівномірного руху, а відтак вираз для визначення максимального значення величини сили удару хвилі рідини об стінки ємності можна представити у такому вигляді:

$$\begin{aligned} F_{r_{\mu a} \max} &= \\ &= A_{\mu a} e^{-\mu t_{2\mu a}} \left[(c_{p_{\mu a}} - \mu^2) \sin(\mu_1 t_{2\mu a} + \beta_{\mu a}) + \mu \mu_1 \cos(\mu_1 t_{2\mu a} + \beta_{\mu a}) \right] + \\ &+ (c_{p_{\mu a}} + i\mu r_{\mu} \omega) \sum_{r_{\mu}=-\infty}^{+\infty} \frac{c_{r_{\mu}}}{\omega_{i_{\mu}}} e^{ir_{\mu}\omega t}. \end{aligned} \quad (25)$$

Нижче показано, як змінюється величина сили удару рідини об стінки прямокутної ємкості в екстремальних режимах руху машини залежно від довжини і ширини ємкості, висоти наповнення рідиною (рис.3а) та пришвидшення (рис.3б) у разі екстреного гальмування чи розгону.

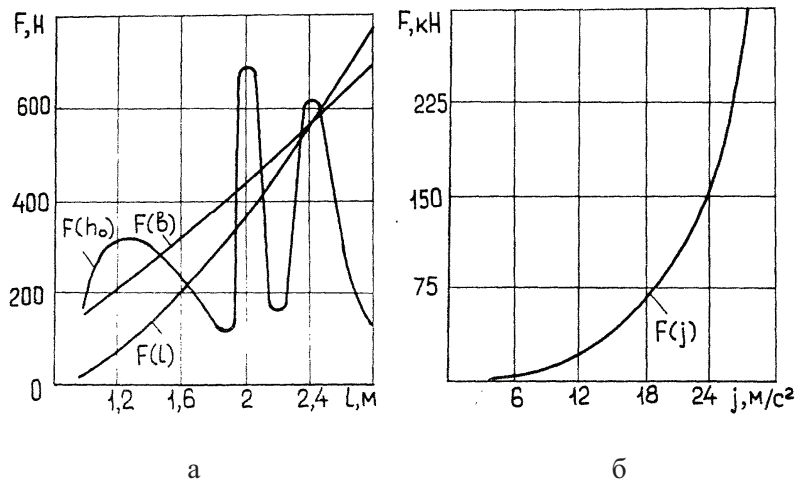


Рисунок 3 - Зміна сили удару рідини до стінки корпусу обприскувача залежно від довжини і ширини ємкості, висоти наповнення рідиною ємкості (а) та залежно від пришвидшення руху її машини (б)

Figure 3 - Change in the force of the impact of the liquid on the wall of the body of the sprayer, depending on the length and width of the tank, the height of filling the liquid capacity (a) and depending on the speed of its car (b)

Сила удару рідини об стінки прямокутної ємкості зростає із збільшенням довжини, ширини ємкості і висоти наповнення рідиною. Особливо сильно зростає сила удару рідини об стінки ємкості при збільшенні пришвидшення транспортного засобу, що в кінцевому підсумку, понижує його динамічну стійкість.

Висновок з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі.

Отже, запропонована інженерна методика розрахунку щодо аналізу впливу дії гідродинамічних сил рідини на стінки рухомої прямокутної ємкості дала змогу безпосередньо знайти у замкнутій формі величину горизонтальної сили удару хвилі рідини об стінки ємкості при її прямолінійному русі з постійним пришвидшенням, з пришвидшенням, що змінюється за гармонічним або довільним періодичним законом.

Одержані результати досліджень можуть бути використані при розрахунках стійкості та плавності руху транспортних засобів, що містять прямокутні ємкості, частково заповнені рідиною.

Отже, при проектуванні нових мобільних машин, які мають ємкості для транспортування рідин, необхідно враховувати вплив рухливості рідини в цих ємкостях для забезпечення необхідної стійкості руху та плавності ходу машини.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Бояршина Л.Г., Кузьма В.М., Хохлова В.В. Резонансные колебания свободной поверхности жидкости в цилиндрическом и прямоугольном резервуарах при горизонтальных вибрациях //Динамика и колебания механических систем. Межв. сб. науч. тр. Иванова. 1986. С. 108 - 117.
2. Богомаз Г.И. Динамика железнодорожных вагонов – цистерн.- К.: Наук. думка, 2004. – 222 с.
3. Василенко Н.В. Теория колебаний.- К.:Вища шк., 1992.- 430 с.
4. Дмитриченко М.Ф., Вікович І.А. Динаміка мобільних машин з начіпними функціональними елементами: Монографія. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2008. - 496 с.
5. Жуковский Н.Е. О движении твердого тела, имеющие полости наполненные однородной капельной жидкостью/Собр. соч. Т. 2. Вып. 1. М.-Л.: 1931. - 136 с.
6. Луковский И.А., Барняк М.Я., Комаренко А.Н. Приближенные методы решения задач динамики ограниченного объема жидкости.- К.:Наук. думка, 1984. -232 с.
7. Методы расчета присоединенных масс жидкости в подвижных полостях/Фещенко С.Ф., Луковский И.А., Рабинович Б.И. и др.- К.:Наук. думка, 1975. - 135 с.

8. Микишев Г.Н., Рабинович Б.И. Динамика твердого тела с полостями, частично заполненными жидкостью.- М.:Машиностроение, 1968. - 532 с.
9. Мойсеев Н.Н., Румянцев В.В. Динамика тела с полостями, содержащими жидкость.-М.: 1965.- 439 с.
10. Нариманов Г.С. О движении сосуда, частично заполненного жидкостью: учет немалости движения последней//Прикладная математика и механика.-М.: 1957. Т. XXI. Вып. 4.-С. 513-524.
11. Рабинович Б.И. Введение в динамику ракет-носителей космических аппаратов.-М.:Машиностроение, 1975. - 416 с.
12. Столбенцев В.И. О колебаниях жидкости в сосуде, имеющем форму прямоугольного параллелепипеда//Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1967. 31. - С. 67 - 76.
13. Филатов А.Н. О динамическом действии жидкости на цистерну при произвольном ускорении//Труды института математики механики АН УзССР. - Ташкент: 1957. Вып. 21. - С. 107 – 111

REFERENCES

1. Boyarshin L.G., Kuz'ma V.M., Khokhlova V.V. (1986). Rezonansny kolebaniya svobodnoy poverkhnosti zhidkosti v tsilindricheskikh i pryamougolnogo rezervuarakh pri gorizontalnykh vibratsii // Dinamika i kolebaniya mekhanicheskikh sistem. Mezhd. sb. nauch. tr. Ivanova.. S. 108 – 117 [Resonant oscillations of free surface of fluid in cylindrical and rectangular tanks with horizontal vibrations], Moskva [in. Rossija].
2. Bogomaz G.I.(2004). Dinamika zheleznodorozhnykh vagonov – tsistern [Dynamics of rail cars - tanks],Kyiv: .: Nauk. Mneniye [in.Ukrainian].
3. Vasilenko N.V.(1992). Teoriya kolebaniy [The theory of oscillations], Kyiv: Vishcha shk [in.Ukrainian].
4. Dmitrichenko M.F.,Vikovich I.A.(2008). Dinamika mobilnykh mashin s navesnymi funktsional'nymi yelemptamy [Dynamics of mobile machines with hinged functional elements:], Lviv: Lvivskaya politekhnika [in.Ukrainian].
5. Zhukovsky N.E.(1931).O dvigenii tverdogo tela imeushchie polosti napolnenye odnorodnoy kapelnoy gbdkostu [On the motion of a rigid body having cavities filled with a uniform droplet liquid] Coll. soch T. 2. Extract 1. M. - 136 p., Moskva [in. Rossiia].
6. Lukovsky I.A, Barnyak M.Ya., Komarenko A.N.(1984). Pribligonnye metody resheniia zadach dinamiki ogranichenogo objema gidkosti [Approximate methods for solving problems of the dynamics of a limited volume of fluid], Kiiv: Nauk.Dumka[in.Ukrainian].
7. Feshchenko S.F., Lukovskii I.A., Rabinovich B.I.(1975).[Methods of calculation of adjoining masses of fluid in moving cavities], Kyiv: Nauk.Dumka[in.Ukrainian].
8. Mikishev G.N, Rabinovich B.I.(1968).Dinamika tvedogo tela s polostiami, chastichno zapolnennymi gidrostiu [Dynamics of a solid with cavities partially filled with liquid], Moskva: Mashinostroenie [Rossisija].
9. Moiseev NN, Rumyantsev V.V.(1965). Dinamika tela s polostiami sodergaschimi gidrostiu [Dynamics of the body with cavities containing liquid]. Moskva: Mashinostroenie [Rossisija].
10. Narimanov G.S.(1957). O dvigenija tela, s polostiami, chastichno zapolnennymi gidrostiu, uchet nemalosti dvigenija poslednej [On the motion of a vessel partially filled with a fluid: the account of the abundance of the latter movement // Applied mathematics and mechanics.T. XXI. Yield 4], Moskva: Mashinostroenie [Rossisija].
11. Rabinovich B.I.(1975).Vvedeniye v dinamiku raket – nositelej kosmicheskikh apparatov, [Introduction to the dynamics of rocket carriers of spacecraft.], Moskva: Mashinostroenie [Rossisija].
12. Stolbentsev V.I.(1967).O kolebaniiah gidkosti v sosude, imeiushih formu prsamougolnogo paralepipeda [On oscillations of a liquid in a vessel having the shape of a rectangular parallelepiped, Izv. Academy of Sciences of the USSR. Mechanics of liquid and gas.. 31. - P. 67 - 76.], Izvestiya AN SSSR[in.Rosija].
13. Filatov A N.(1957). O dinavicheskom dejstvii gidkosti na cistern pri proizvolnom uskorenii [On the dynamic action of a liquid on a tank at arbitrary acceleration // Proceedings of the Institute of Mathematics of Mechanics of the Academy of Sciences of the UzSSR.- . Izp. 21. - P. 107 – 111} Tashkent: [in.Uzbecka Respublika].

РЕФЕРАТ

Вікович І.А. Обґрунтування спрощеного аналітичного методу визначення величини горизонтальної сили удару рідини об стінки рухомої прямокутної ємкості / І.А. Вікович, М.Ф. Дмитриченко // Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник. – К. : НТУ, 2018. – Вип. 1 (40).

У статті проведено аналіз наукових праць, які стосуються коливань рухомих ємкостей, частково заповнених рідиною.

Запропоновано інженерний підхід для визначення максимальної величини горизонтальної сили удару рідини об стінки прямокутної ємкості машини під час її нерівномірного поступального руху.

Об'єкт дослідження – коливання рідини у рухомих, частково заповнених ємкостях,

Мета роботи - визначення максимальної величини горизонтальної сили удару рідини об стінки прямокутної ємкості в екстремальних режимах руху машини.

Метод дослідження – розроблено новий спрощений аналітичний метод у якому математична модель побудована на основі енергетичного підходу і зміни координати центра маси рідини у рухомій прямокутній ємкості в процесі її коливань.

Результати статті можуть бути впроваджені під час проектування автоцистерн для перевезення різних рідин.

Прогнозовані припущення щодо розвитку об'єкта дослідження - пошук оптимальних режимів руху авцистерн під час перевезення різних рідин.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: РУХОМА ПРЯМОКУТНА ЄМКІСТЬ, РІДИНА ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ, КОЛИВАННЯ, СИЛА, УДАР.

ABSTRACT

Vikovych I.A., Dmitrichenko M.F. A substantiation of a simplified analytical method for determining the magnitude of the horizontal force of impact of a fluid on the wall of a mobile rectangular container. Visnyk National Transport University. Series «Technical sciences». Scientific and Technical Collection. – Kyiv: National Transport University, 2018. – Issue 1 (40).

The article deals with the analysis of scientific works concerning the variations of mobile containers partially filled with liquid. An engineering approach is proposed for determining the maximum value of the horizontal force of impact of a liquid on the wall of a rectangular container of a machine during its uneven translational motion.

The object of the study is fluid fluctuations in moving, partially filled containers,

The purpose of the work is to determine the maximum value of the horizontal force of the impact of the liquid on the wall of the rectangular container in the extreme modes of movement of the machine.

Method of research - A new simplified analytical method was developed in which a mathematical model is based on the energy approach and the change of the coordinate of the center of mass of fluid in a moving rectangular reservoir during its oscillation.

The results of the article can be implemented during the design of tank-vehicles for the transport of various liquids.

Predictable assumptions about the development of the research object are the search for optimal modes of movement of the tanker during the transport of various liquids.

KEYWORDS: MOVABLE TRANSMITTING CAPACITY, LIQUID, DYNAMIC PROCESSES, COLLINS, STRENGTH, SHOCK.

РЕФЕРАТ

Виковыч И.А. Обоснование упрощенного аналитического метода определения величины горизонтальной силы удара жидкости о стенки подвижной прямоугольной емкости / И.А. Виковыч, Н.Ф. Дмитриченко // Вестник Национального транспортного университета. Серия «Технические науки». Научно-технический сборник. – К.: НТУ, 2018. – Вып. 1 (40).

В статье проведен анализ научных работ, касающихся колебаний подвижных емкостей, частично заполненных жидкостью. Предложено инженерный подход для определения максимальной величины горизонтальной силы удара жидкости о стенки прямоугольной емкости машины во время ее неравномерного поступательного движения.

Объект исследования - колебания жидкости в подвижных, частично заполненных емкостях.

Цель работы - определение максимальной величины горизонтальной силы удара жидкости о стенки прямоугольной емкости в экстремальных режимах движения машины.

Метод исследования – разработано новый упрощенный аналитический метод в котором математическая модель построена на основе энергетического подхода и изменения координаты центра массы жидкости в подвижной прямоугольной емкости в процессе ее колебаний.

Результаты статьи могут быть внедрены при проектировании автоцистерн для перевозки различных жидкостей.

Прогнозируемые предположения относительно развития объекта исследования - поиск оптимальных режимов движения авцистерн при перевозке различных жидкостей.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ПОДВИЖНАЯ ПРЯМОУГОЛЬНАЯ ЕМКОСТЬ, ЖИДКОСТЬ, ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ, КОЛЕБАНИЯ, СИЛА, УДАР.

АВТОРИ:

Вікович Ігор Андрійович, доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри транспортних технологій, e-mail: wикович@gmail.com.ua, тел.: +380974428686, Україна, 79013, м. Львів, вул. С. Бандери 13, к.6, orcid.org /0000-0000-0000-0000.

Дмитриченко Микола Федорович, доктор технічних наук, академік Академії педагогічних наук України, ректор Національного транспортного університету, професор, тел., +380442808203, Україна 01010, м. Київ, вул. Омеляновича-Павленка,1.

AUTHORS:

Igor Andreevich Vikovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Lviv Polytechnic National University, Professor, Department of Transport Technologies, e-mail: wикович@gmail.com.ua., Tel .: +380974428686, Ukraine, 79013, Lviv, vul. . Bandera 13, k.6, orcid.org/0000 - 0000 - 0000 - 0000.

Dmitrichenko Mykola Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Academician of the Academy of Pedagogical Sciences of Ukraine, Rector of the National Transport University, Professor, tel., +380442808203, Ukraine 01010, Kyiv, vul. Omelyanovicha - Pavlenko, 1.

АВТОРЫ:

Викович Игорь Андреевич, доктор технических наук, профессор, Национальный университет «Львовская политехника», профессор кафедры транспортных технологий, e-mail: wикович@gmail.com.ua., Тел .: +380974428686, Украина, 79013, г.. Львов, ул . С. Бандеры 13 к.6, orcid.org / 0000 - 0000 - 0000 - 0000.

Дмитриченко Николай Федорович, доктор технических наук, академик Академии педагогических наук Украины, ректор Национального транспортного университета, профессор, тел., +380442808203, Украина 01010, г.. Киев, ул. Омеляновича - Павленко, 1.

РЕЦЕНЗЕНТИ:

Харченко Є.В., доктор технічних наук, професор, Національний університет «Львівська політехніка», завідувач кафедри опору матеріалів та будівельної механіки, Інститут будівництва та інженерії довкілля, Львів, Україна.

Гуляев В.І., доктор технічних наук, професор, Національний транспортний університет, завідувач кафедри вищої математики, Київ, Україна.

REVIEWS:

Kharchenko E.V., Doctor of Technical Sciences, professor, Lviv Polytechnic National University, Head of the Department of Materials and Construction Resistance, Institute of Building and Environmental Engineering, Lviv, Ukraine.

Gulyaev VI, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Transport University, Head of the Department of Higher Mathematics, Kyiv, Ukraine.