

Висновки

Для уточненого розрахунку робочого процесу розроблено математичну модель робочого процесу дизеля, що враховує конструктивні та режимні фактори, які впливають на його показники. Концепція математичного моделювання робочого процесу полягає в обліку взаємозв'язку параметрів робочого процесу і конструктивних параметрів дизеля.

Створена комп'ютерна програма для розрахунку робочого процесу дизеля дозволяє отримувати інформативні дані про перебіг робочого процесу під впливом конструктивних і режимних факторів та забезпечує більш обґрунтоване призначення граничних умов при подальших розрахунках та проектуванні конструктивних і режимних параметрів досліджуваних двигунів.

Література

1. А.П. Марченко, О.О. Осетров, О.Ю. Линьків. Математична модель процесу згоряння палива у дизелі. Двигуни внутрішнього згоряння. Харків.2013. №1. С. 3-10.
2. Разлейцев Н. Ф. Моделювання та оптимізації процесу згоряння в дизелях / Н. Ф. Разлейцев. - Харків: Вища школа. Вид-во при Харк. ун-ті, 1980. – 169 с.

УДК 556.536

ГІДРАВЛІЧНЕ І ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРНО СТІЙКИХ ХВИЛЬ У ПРЯМОКУТНОМУ РУСЛІ

Авершин Андрій Геннадійович, канд. техн. наук, доцент кафедра ДМ та ТММ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: avershin.andrey@gmail.com, ORCID: 0000-0002-9522-7229

Біловол Олександр Васильович, канд. техн. наук, доцент кафедра ДМ та ТММ, Харківський національний автомобільно-дорожній університет,
e-mail: avbelovol58@gmail.com, ORCID: 0009-0006-4465-6206

Найбільш важливими водоперепускними спорудами на водотоках є мостові переходи. На них безпосередньо впливають хвильові збудження, такі як повені, хвилі заповнення під час проривів та обвалів дамб, а також хвилі підпору під час зміни рівня води у водосховищах. Структурно стійкі хвильові збудження в нелінійному середовищі, які поширюються з постійною швидкістю, не змінюючи форми та залишаючись локалізованими, називаються солітонами. Вважається, що виникнення солітону є результатом двох факторів. Один з яких сприяє збільшенню ширини хвилі, а інший – зменшенню її ширини та збільшенню її крутизни. У випадку потенційного руху ідеальної рідини такими факторами є нелінійність, яка збільшує крутизну профілю хвилі та є проявом інерційних сил, а також дисперсія, яка призводить до розбіжності

хвильового пакета та є проявом дії гравітаційних сил. Такий солітон описується рівнянням Кортевега-де Фріза [1-6]. У випадку турбулентного руху реальної рідини дисипація стає основною причиною згладження хвиль. В результаті конкуренції між нелінійністю та втратами генерується солітон, який можна отримати з рівняння Сен-Венана [7] у вигляді сходина або ударної хвилі.

Недоліком цих моделей є те, що в реальній ситуації необхідно враховувати дію всіх трьох сил, тобто сил інерції, сил тяжіння та сил внутрішнього тертя. Крім того, в обох випадках рівняння отримані за умов плавно змінного руху рідини, тобто вони не враховують відцентрові сили інерції, що виникають при викривленні траєкторій частинок і порушують розподіл гідростатичного тиску в перерізах живого потоку.

Мета роботи полягає в отриманні рівнянь, що описують структурно стійкі утворення у прямокутних каналах, в аналізі цих рівнянь з метою їх розв'язання, визначенні основних характеристик хвиль та перевірці результатів гідравлічних розрахунків за допомогою числових методів.

Розглянемо структурно стійку ізольовану хвилю, що рухається в прямокутному призматичному каналі зі сталою швидкістю. Перейдемо до системи координат, в якій хвиля нерухома. У цьому випадку можна використовувати стаціонарне рівняння швидкозмінного руху, яке включає питому силу тяжіння, питому силу тертя та питому силу інерції. Під питомою силою інерції будемо розуміти проекцію результуючих відцентрових сил, що виникають під час викривлення струменів, на напрямок основного потоку.

Рівняння різкозмінного руху у призматичному руслі має вигляд:

$$\frac{dE}{dh} \frac{dh}{dl} = i - I - I',$$

де E - питома енергія перерізу, i - похил дна, I - гідродинамічний похил, I' - питома сила інерції.

Питома енергія поперечного перерізу складається з питомої потенційної енергії гравітаційних сил, яка дорівнює глибині та питомої кінетичної енергії:

$$E = h + \frac{\alpha q^2}{2gh^2}.$$

Відносна питома витрата і швидкість хвилі виражаються через абсолютні питомі витрати і глибини на початку та в кінці хвилі з рівняння нерозривності:

$$q = q' - ch' = q'' - ch'',$$

$$c = \frac{q'' - q'}{h'' - h'}.$$

Спряжені глибини визначаються з теореми про зміну кількості руху:

$$\frac{(h')^2}{2} + \frac{\alpha q^2}{h'g} = \frac{(h'')^2}{2} + \frac{\alpha q^2}{h''g}.$$

З практичної точки зору достатньо скористатися ліанеризованою версією рівняння різкозмінного руху у безрозмірних змінних

$$h = \frac{h - h_0}{h_0}, l = \frac{l}{h_0},$$

яка має вигляд:

$$\frac{d^2h}{dl^2} + 2b \frac{dh}{dl} + k^2h = 0,$$

де сталі коефіцієнти дорівнюють:

$$2b = \frac{\beta h_0}{h_k} \frac{\Delta E}{\Delta h}, k^2 = ix\beta \frac{h_0}{h_k}.$$

Більша нормальна h_0 , критична h_k і менша спряжена h' глибини, а також втрати енергії у стрибку ΔE і гідравлічний показник русла x , визначаються у звичайний для гідравліки прямокутних русел спосіб.

Початкові умови мають вигляд:

$$h(l=0) = h', \frac{d^2h}{dl^2}(l=0) = 0.$$

Остання з цих умов полягає в тому, що на початку хвилі має місце точка перегину, увігнута крива підпору переходить в опуклу криву підпору, характерну для її передньої частини.

Рішення для одnogорбого солітона має вигляд:

$$h = h' \left(1 + \frac{b(l-ct)}{2h_0} \right) e^{\frac{b(l-ct)}{h_0}}.$$

Отримані аналітичні розв'язки потребують підтвердження експериментальним або чисельним моделюванням [8].

Чисельна гідродинаміка (CFD) ефективно моделює двофазні потоки з вільною поверхнею, включаючи одиночні хвилі. У цій роботі нестационарний

двофазний потік води і повітря, що утворюється в результаті поширення одиночної хвилі, моделюється за допомогою програмного пакету OpenFOAM.

Основним аспектом моделювання багатофазних течій є точне відтворення інтерфейсу між рідинами. Для цього використовуються два підходи:

1. Методи відстеження поверхні: Явно описують інтерфейс, але нестійкі при його сильній деформації, тому погано підходять для моделювання ударних хвиль.

2. Волюметричні методи: Не відстежують інтерфейс явно, а відновлюють його всередині комірки сітки. Метод об'ємних часток (VOF), який використовує індикаторну змінну (α), виявився обчислювально ефективним і надійним для моделювання хвиль, тому саме він був обраний у даному дослідженні.

Для моделювання в'язкої нестисливої течії з рухомою вільною поверхнею використовувалися рівняння Нав'є-Стокса. Їх розв'язок здійснювався за допомогою методу скінченних об'ємів другого порядку точності, в якому для зв'язку тиску та швидкості застосовувався алгоритм PISO. Обчислювальна область була двовимірною та мала форму прямокутного каналу довжиною 20 м і глибиною 0,5 м. Для коректного розрахунку примежового шару сітка з структурованих комірок була згущена поблизу твердих стінок.

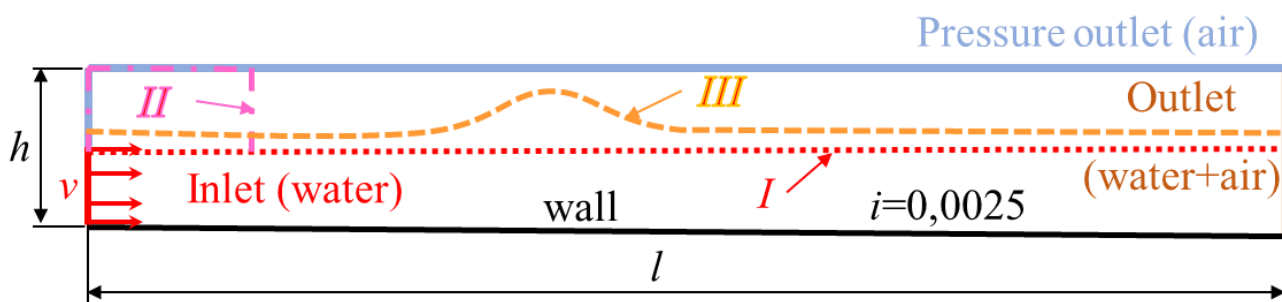


Рисунок 1 – Схема обчислювальної області і моделювання процесу формування солітонів

I - стаціонарне моделювання двофазного потоку, II - додавання об'єму води, III – нестаціонарне моделювання поширення солітону

Для моделювання генерування та вільного руху солітону були задані відповідні граничні умови (Рис. 1). Вхідна межа була налаштована як «вхід із заданою швидкістю», а вихідна як «вихід із заданим тиском»; обидві зони були доповнені демпфуючими ділянками для мінімізації відбиття хвиль. Дно каналу було задане як стінка з умовою «без ковзання», а верхня межа імітувала відкру атмосферу.

Початкові умови течії задавалися наступним чином: питомі витрати на вході становили 0,07–0,09 м²/с, на виході — 0,06–0,08 м²/с, фонові швидкості потоку — 0,6–0,8 м/с, а початкова швидкість розповсюдження солітону становила 1,22 та 2,33 м/с.

Створення солітону відбувалося у два етапи. На першому етапі проводилося стаціонарне моделювання двофазного потоку (вода + повітря) для отримання початкового стану. На другому етапі здійснювалося одноразове додавання

об'єму води та проводилося нестационарне моделювання для безпосереднього генерування солітону [9-10].

Аналіз результатів дослідження

Результати чисельного моделювання солітона в різні моменти часу показані на рис. 3.

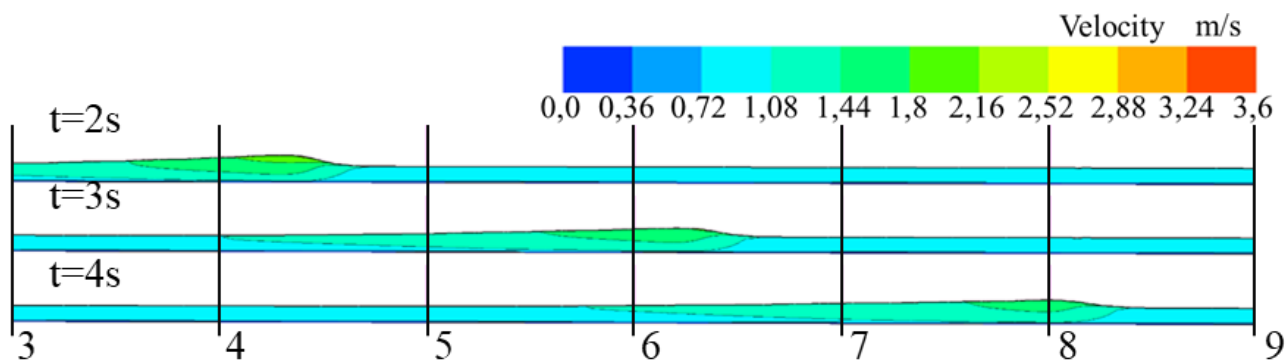


Рисунок 2 – Поле швидкості одиночної хвилі в двогорбому солітоні в різні моменти часу

Результати моделювання демонструють стабільне поширення солітону, який зберігає свою форму і швидкість на великих відстанях, що відповідає теоретичним прогнозам.

Було розглянуто двогорбий солітон.

Отримані поля швидкості та тиску дають цінну інформацію про внутрішню структуру потоку та розподіл енергії солітонних хвиль].

Висновки

Гідравлічні методи були використані для отримання рівнянь, що описують усі без винятку солітоноподібні утворення у відкритих каналах. Було проведено лінійний аналіз цих рівнянь. Були знайдені аналітичні розв'язки, які дозволили визначити основні характеристики хвиль. Результати теоретичних розрахунків були перевірені за допомогою числових методів.

Перевагою запропонованого аналітичного підходу до опису солітоноподібних структур у відкритих каналах порівняно з раніше запропонованими є можливість легкого отримання основних характеристик таких структур та проведення детального аналізу їх зв'язку без використання числових методів.

Перелік посилань

1. H. G. Lee, S. Kwak, Jyoti, Y. Nam, and J. Kim, "A normalized time-fractional Korteweg–de Vries equation," *Alexandria Eng. J.* 125, 83–89 (2025); <https://doi.org/10.1016/j.aej.2025.03.137>
2. A. Alomair, A. S. Al Naim, and A. Bekir, "Exploration of soliton solutions to the special Korteweg–de Vries equation with a stability analysis and modulation instability," *Mathematics* 13, 54 (2025); <https://doi.org/10.1063/1.2909659>

3. S. Arshed, G. Akram, M. Sadaf, and K. Saeed, "Construction of new solutions of Korteweg–de Vries Caudrey-Dodd-Gibbon equation using two efficient integration methods," PLOS ONE 17, e0275118 (2022); <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0275118>
4. S. A. El-Tantawy, A. H. Salas, and W. Albalawi, "New localized and periodic solutions to a Korteweg–de Vries equation with power-law nonlinearity: Applications to some plasma models," Symmetry 14, 197 (2022); <https://doi.org/10.3390/sym14020197>
5. W. W. Mohammed and F. M. Al-Askar, "New stochastic solitary solutions for the modified Korteweg–de Vries equation with stochastic term/random variable coefficients," AIMS Math. 9, 20467–20481 (2024); <https://doi.org/10.3934/math.2024995>
6. R. W. S. Westdorp and H. J. Hupkes, "Long-timescale soliton dynamics in the Korteweg–de Vries equation with multiplicative translation-invariant noise," Physica D: Nonlinear Phenom. 460, 134065 (2024); <https://doi.org/10.1016/j.physd.2024.134065>
7. D.-S. Shih and G.-T. Yeh, "Studying inertia effects in open channel flow using Saint-Venant equations," Water 10, 1652 (2018); <https://doi.org/10.3390/w10111652>
8. A. Bayon and P. López-Jiménez, "Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM," J. Hydroinform. 17, 662–678 (2015); <https://doi.org/10.2166/hydro.2015.041>
9. X. Song, J. Yao, W. Liu, Y. Shu, and F. Xu, "Numerical generation of solitary wave and its propagation characteristics in a step-type flume," J. Mar. Sci. Eng. 11, 35 (2023); <https://doi.org/10.3390/jmse11010035>
10. A. Avershyn and O. Bilovol, "Universal flow energy dissipator," AIP Conf. Proc. 3428, 020015 (2025); <https://doi.org/10.1063/12.0038605>

УДК 621.43.019:621.43-222.2

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ШЕСТИТАКТНИХ ДВИГУНІВ ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ ТА СПОСОБИ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЕФЕКТИВНОСТІ

Віштак Інна Вікторівна, канд. техн. наук, доцент кафедра БЖДПБ,
Вінницький національний технічний університет,
e-mail: innavish322@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5646-4996

Комендра Артем Олександрович, бакалавр,
Вінницький національний технічний університет,
e-mail: artemkomendra08@gmail.com

Підвищення ефективності двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) залишається одним із ключових напрямів розвитку сучасного автомобілебудування в умовах енергетичного переходу та посилення екологічних вимог. Значна частина енергії палива втрачається у вигляді