

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПОБУДОВИ ВІЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ГІДРАВЛІЧНОГО СТРИБКА НА ОСНОВІ РІВНЯННЯ РІЗКОЗМІННОГО РУХУ І ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

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

Виникнення відігнутого або насунутого гідравлічного стрибка в системах дорожнього водовідведення суттєво впливає на надійність функціонування цих систем і може стати причиною їх руйнування. Визначення основних характеристик гідравлічного стрибка є важливим елементом гідравлічних розрахунків, що спрямовані на запобігання негативних наслідків його утворення. Вони використовуються при проектуванні водобійних споруд, таких як водобійні колодязі, комбіновані водобійні колодязі, водобійні стінки, багатоступінчасті перепади. Донедавна гідравлічні методи, здебільшого побудовані на емпіричних залежностях, не дозволяли з задовільною точністю визначити довжину гідравлічного стрибка, яка безпосередньо пов'язана з розмірами ями розмиву у місці виникнення стрибка.

Щоб отримати довжину гідравлічного стрибка необхідно встановити форму його вільної поверхні. Сьогодні для цього можна скористатися або рівнянням різкозмінного руху, або чисельним моделюванням. Рівняння різкозмінного руху ґрунтовані на гідравлічному підході і враховують крім питомої сили тяжіння і питомої сили тертя питому силу інерції, тобто проекцію рівнодіючої відцентрових сил, що виникають при викривленні струменів при різко змінному русі, на напрямок основного потоку. Перевагою гідравлічного підходу є можливість теоретичного аналізу впливу на форму поверхні потоку різноманітних гідравлічних характеристик аналітичними методами. Перевагою чисельного моделювання є те, що крім форми вільної поверхні можна отримати структуру всього потоку. В роботі проводиться порівняльний аналіз побудови вільної поверхні гідравлічного стрибка на основі рівняння різкозмінного руху і чисельного моделювання.

В роботі ставилось за мету показати можливості, переваги та обмеження гідравлічного і чисельного моделювання гідравлічного стрибка в системах дорожнього водовідведення

Рівняння різкозмінного руху у призматичному руслі має вигляд:

$$\beta \frac{\alpha v^2}{g} \frac{d^2 h}{dl^2} - \frac{dE}{dh} \frac{dh}{dl} + i - I = 0,$$

де E - питома енергія перерізу, i - похил дна, I - гідродинамічний похил, α і β - коефіцієнти, що враховують нерівномірність розподілу швидкостей і сил інерції відповідно.

З практичної точки зору достатньо скористатися його ліанеризованою версією у безрозмірних змінних:

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

де сталі коефіцієнти дорівнюють:

$$2b = 32\sqrt[3]{3ix} \frac{a^2}{h'h_k}, k^2 = 128\sqrt[3]{3i^2x^2} \frac{h_0}{h_k}.$$

Нормальна, критична і менша спряжені глибини, а також висота стрибка і гідравлічний показник русла, визначаються у звичайний для гідравліки відкритих русел спосіб.

У випадку, коли $b > k$, маємо рішення у вигляді, що відповідає досконалому гідравлічному стрибку:

$$h = C_1 \exp(b_1l) + C_2 \exp(b_2l),$$

де $b_1 = -b - \sqrt{b^2 - k^2}$, $b_2 = -b + \sqrt{b^2 - k^2}$.

У випадку, коли $b < k$, маємо рішення у вигляді, що відповідає хвилястому стрибку:

$$h = \exp(-bl) (C_1 \sin(k_1l) + C_2 \cos(k_1l)),$$

де $k_1 = \sqrt{k^2 - b^2}$.

Невідомі сталі визначаються з початкових умов:

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

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

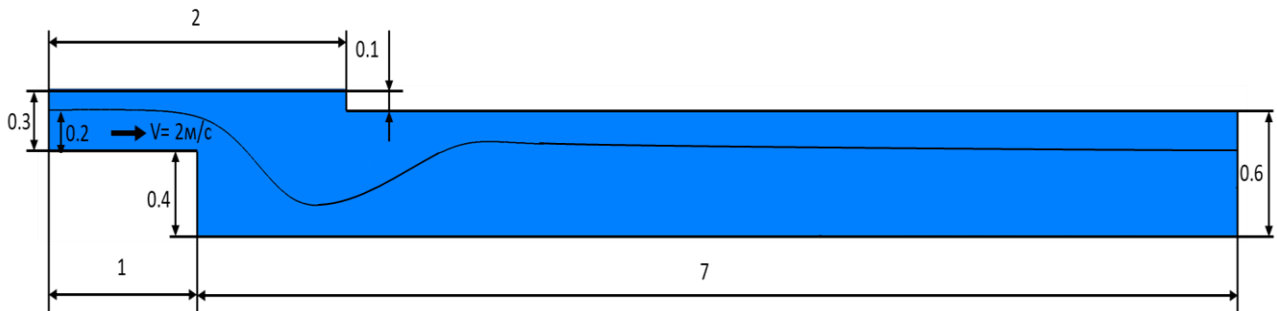


Рисунок 1 – Досконалий гідравлічний стрибок (гідравлічний розрахунок)

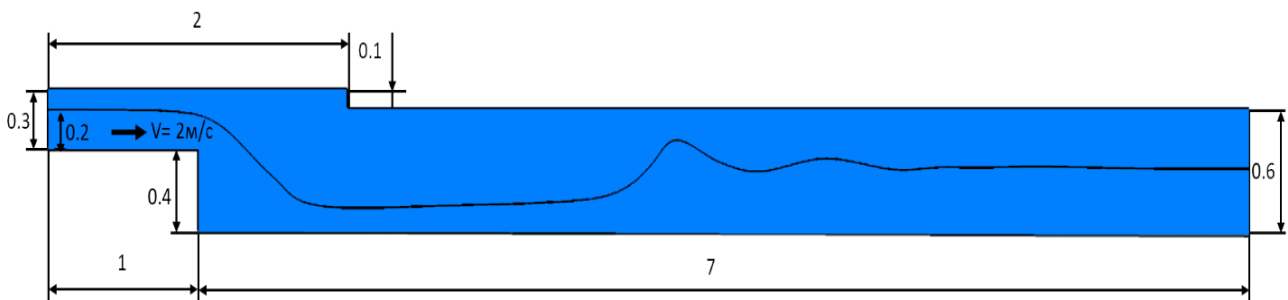


Рисунок 2 – Хвилястий гідравлічний стрибок (гідравлічний розрахунок)

Обчислювальна гідродинаміка (CFD) є потужним інструментом для моделювання двофазних течій, таких як гідравлічний стрибок. Чисельне моделювання двофазного потоку «вода - повітря» у нестационарному режимі проводилося за допомогою програмного пакету Open FOAM.

Співіснування та взаємодія декількох рідин і спосіб визначення межі розділу між ними має першорядне значення при чисельному моделюванні багатфазних течій. Для моделювання цього явища необхідно розробляти складні алгоритми, стабільність і точність яких сильно впливають на кінцеві результати моделювання. Методи відстеження поверхні поділяються на дві групи підходів, а саме: поверхневі методи та об'ємні методи. З одного боку, поверхневі методи явно визначають вільний інтерфейс за допомогою лагранжевого підходу, тобто відстеження набору частинок-маркерів поверхні, або за допомогою ейлерового підходу, тобто визначення функцій, які визначають положення вільної поверхні. Ці методи представляють проблеми топології при роботі з сильно деформованими течіями і поверхнями розриву. З цієї причини вони не вважаються придатними для моделювання гідравлічних стрибків.

З іншого боку, об'ємні методи краще адаптуються до такого роду явищ, але не визначають чіткої межі розділу потоків явно. Замість цього, в модель потрібно впровадити метод відстеження поверхні. Деякі моделі використовують підхід Ейлера-Лагранжа (метод частинок на рідині), що поєднує в собі ейлерову роздільну здатність течії з відстеженням частинок. Однак у тривимірних моделях велика кількість необхідних частинок робить

обчислювальну вартість цього підходу недоступною. З цієї причини в даній моделі використовується повністю ейлерівський підхід[4, 6].

Такий підхід виявився більш ефективним з точки зору обчислень, оскільки він має справу лише з одним значенням змінної для кожного елемента сітки. Цією змінною є індикаторна властивість (α), що виражає частку тієї чи іншої рідини, що міститься в кожному елементі сітки[5].

В'язка турбулентна течія описується системою рівнянь Нав'є-Стокса в області з рухомими межами [5]. Для інтегрування рівнянь Нав'є-Стокса обрано різницеву схему Бім-Вімінга [3].

Розрахункова область будувалася у 2D постановці. Модель із розмірами 0,7м x 8м (рис. 1). Розрахункова область описувалася гекса сіткою потужністю близько 300×10^3 вузлів зі згущеннями поблизу твердих поверхонь для опису прикордонного шару.

Граничні умови, що накладаються для виникнення гідравлічного стрибка, складаються з надкритичного входу потоку, підкритичного виходу потоку, гладких нижньої та бічних стінок і верхньої відкритої ділянки повітря (рис. 2).

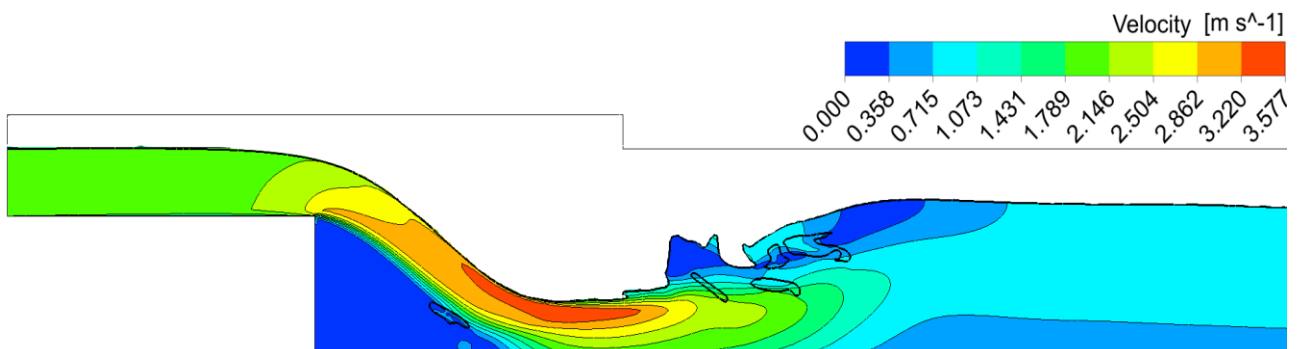


Рисунок 3 – Поле швидкості у досконалому стрибку

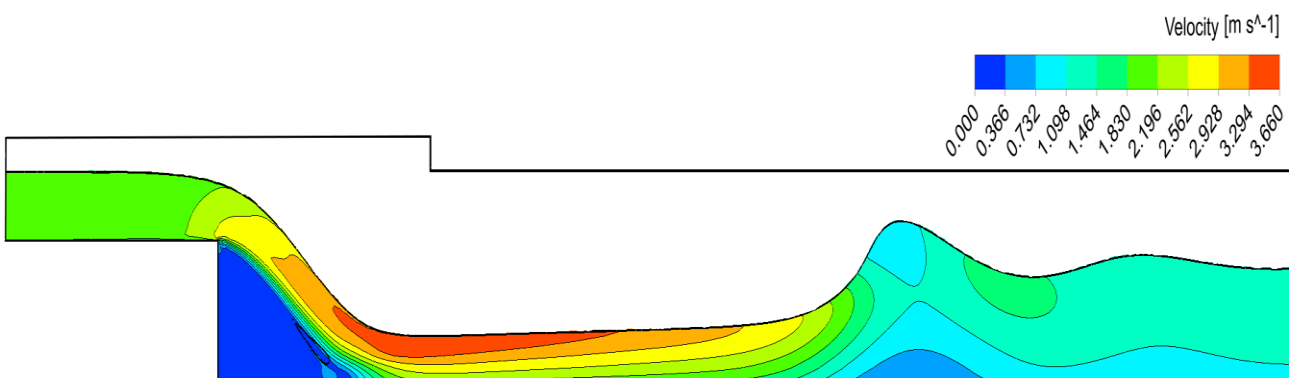


Рисунок 4 – Поле швидкості у хвилястому стрибку

Візуальний аналіз результатів моделювання дозволяє зробити висновок, що досягається стабілізований гідравлічний стрибок (див. рис. 3). При цьому спостерігаються всі характерні ознаки такого стрибка, а саме: компактний і стабільний вигляд, низьке хвилеутворення, поступова деаерація бульбашок,

вихороутворення всередині валу, відсутність відриву потоку у вхідному струмені тощо.

Аналіз поля швидкостей дозволяє оцінити швидкість руху води в критичному перерізі, що в свою чергу спрощує прийняття рішень при проектуванні.

Висновки

Проведено порівняльний аналіз побудови вільної поверхні гідравлічного стрибка на основі рівняння різкозмінного руху і чисельного моделювання.

Перевагою гідравлічного підходу є можливість на етапі проектування теоретичного аналізу впливу на довжину гідравлічного стрибка і ями розмиву різноманітних гідравлічних характеристик русла, таких як форма, розміри і похил, аналітичними методами.

Перевагою чисельних методів моделювання є отримання на останньому етапі розрахунків розподілу швидкостей у гідравлічному стрибку, що дозволяє уявити детальну картину розмивів і визначити заходи по укріпленню русла

Література

1. Chang, S. W., Hsieh, C. M., Lin, C. Y., & Liou, H. F. (2012). Air-Water Drainage Flow through Finned Bend. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 11(1), 177–184. <https://doi.org/10.3130/jaabe.11.177>
2. Hubert Chanson, Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results, *European Journal of Mechanics - B/Fluids*, Volume 28, Issue 2, 2009, Pages 191-210, ISSN 0997-7546, <https://doi.org/10.1016/j.euromechflu.2008.06.004>.
3. Viti, N.; Valero, D.; Gualtieri, C. Numerical Simulation of Hydraulic Jumps. Part 2: Recent Results and Future Outlook. *Water* 2019, 11, 28. <https://doi.org/10.3390/w11010028>
4. Javan, Mitra & Eghbalzadeh, Afshin. (2013). 2D numerical Simulation of Submerged Hydraulic Jump. *Applied Mathematical Modelling*. 37. 6661–6669. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2012.12.016>.
5. Bayon, Arnau & López-Jiménez, P.. (2015). Numerical analysis of hydraulic jumps using OpenFOAM. *Journal of Hydroinformatics*. 17. 662-678. <https://doi.org/10.2166/hydro.2015041>.
6. Kim, Hyung & Choi, Seohye & Park, Moonhyeong & Ryu, Yonguk. (2023). Flow Turbulence and Pressure Fluctuations in a Hydraulic Jump. *Sustainability*. 15. <https://doi.org/10.3390/su151914246>.