

Ю.Д. КОПАНИЦЯ, кандидат технічних наук
Київський національний університет будівництва і архітектури

АНАЛІЗ ВИМІРУ ЕПЮРИ ГІДРОСТАТИЧНОГО ТИСКУ НА КРИВОЛІНІЙНУ ПОВЕРХНЮ. УНІВЕРСАЛЬНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ K123

Приведено аналіз виміру епюри гідростатичного тиску і універсальний метод розрахунку K123.

Ключові слова: сила тиску; епюра; центр ваги; метод K123.

Приведен анализ размерности эпюры гидростатического давления и универсальный метод расчёта K123.

Ключевые слова: сила давления; эпюра; центр тяжести; метод K123.

The analysis of the dimension hydrostatic pressure diagram and universal method for calculating K123.

Key words: pressure force; pressure diagram; center of pressure; metod K123.

Універсальний авторський метод трьох команд K123 для розрахунку сили гідростатичного тиску на плоску і криволінійну поверхні довільної форми представлено в попередніх публікаціях автора [1,2], де приведено теоретичні положення, формули, алгоритми, приклади аналітичного та чисельного розв'язку типових задач із оцінкою точності результатів розрахунку.

В основу метода трьох команд K123 покладено аксіому, що властивості геометричної фігури (епюри гідростатичного тиску) подібні (ізоморфні) властивостям досліджуємого явища – гідростатичному тиску рідини на поверхню.

В розділі гідростатика вивчається суцільне нестисливе середовище – рідина – у стані спокою або відносної рівноваги, що означає наявність нормальних і відсутність дотичних напруг. Особливості рідини відбиваються і на трьох основних властивостях її дії на занурене тіло, яке визначається як межа відношення нормальної напруги до елементарної площі, коли остання прямує до нуля і позначено нами гідростатичним тиском у точці.

Основні властивості гідростатичного тиску [3-15]:

- однаково передається у всіх напрямках;
- нормально до поверхні;
- величина залежить від положення (координати) означеної точки у просторі;

- за законом Паскаля, тиск на поверхню рідини передається у всі точки і без змін.

Властивості рідини в статичному стані повністю відбиваються в особливостях її дії на занурену поверхню довідної форми, і лежать в основі:

- визначення гідростатичного тиску у точці;
- правила будівництва епюри гідростатичного тиску;
- розрахунку силу тиску на всю змочену поверхню.

Для наочного відображення дії рідини на занурену поверхню використовується об'ємне геометричне тіло – епюра тиску, яка будується із урахуванням вищезначених властивостей рідини. У такий спосіб ми повинні отримати геометричну фігуру певного виміру із фізичними властивостями, які повністю характеризують об'єкт відображення – особливості розподілу нормального напруження по поверхні – тиск рідини на поверхню. Використані умовні позначення виміру [16] представлено на рис. 1.


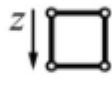


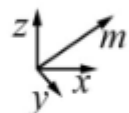




o					
0	1	2	3	4	вимір
-					умовні позначення виміру простору
-	(x)	(x, z)	(x, y, z)	(x, y, z, m)	координати

Рис.1. Вимір простору і умовні позначення

Для епюри гідростатичного тиску (рис. 2, приклад для плоскої поверхні) назначено ортогональні виміри – два ортогональних лінійних розміри (x, z) характеризують площу плоскої поверхні ω , одиниці виміру $[м^2]$, або три координати (x, y, z) – для криволінійної поверхні (рис. 4), і наступний ортогональний вимір має розмірність тиску p , одиниці виміру $[Па]$.

Поверхня і нормально спрямований тиск у кожній точці, який умовно позначається у вигляді розмірної нормальної до поверхні «лінії зі стрілочкою», утворюють відповідну форму епюри з певним об'ємом і одиницями виміру в системі координат (x, y, z) (рис 3).

P					
0	1	2	3	3 / 3	вимір
Па	м	м ²	м ² · Па = Н	"об'єм епюри" / Н	одиниці(СИ)
-	(x)	(x, z)	(x, y, z)	(x, y, z)	координати
-	①D	②D	③D	③D	умовні позначення виміру простору

Рис.2. Вимір епюри гідростатичного тиску на плоску поверхню і вектор рівнодіючої сили тиску

тиск, P	площа поверхні, ω	розмірність епюри	епюра тиску	елемент	
P					
0	1	2	3	3	вимір
-	Па	м ²	м ² · Па = Н	"об'єм епюри" / Н	одиниці(СИ)
-	(y)	(x, z)	(x, y, z)	(x, y, z)	координати
-	①D	②D	③D	③D	умовні позначення виміру простору

Рис.3. Об'єм і вимір епюри гідростатичного тиску

Об'єм епюри в ортогональній системі координат (x, y, z) з відповідною розмірністю $[м, Па, м]$ вимірюється в одиницях сили $(м \cdot м \cdot Па = Н) - P, [Н]$. Форма і об'єм епюри змінюється подібно закону зміни величини гідростатичного тиску в вертикальній площині. Іншими словами, густина рідини і відповідний тиск в кожній точці та сила тиску для кожного елемента поверхні **ізоморфні** (подібні) форми та об'єму відповідного елемента епюри тиску. Вони мають однакову функціональну залежність розподілу і однакову величину:

- **тиск** та відповідний **лінійний розмір** (форма) епюри;
- **сила тиску** та відповідний **об'єм епюри**.

Загально прийнята методика будування епюри гідростатичного тиску на поверхню, з метою візуалізації неперервного розподілу тиску вздовж поверхні, для суцільного середовища – рідини – має свої особливості. Дія рідини – гідростатичний тиск у точці – є величиною скалярною. Скаляр характеризується величиною і має нульову розмірність. Це підтверджує властивість тиску - діє у всіх напрямках однаково.

Аналогічний приклад скалярної величини – температура. Для позначення неперервного розподілу температури на поверхні ми використовуємо кольорове забарвлення самої поверхні, наприклад, від червоного до жовтого. Двовимірний, далі 2D, розмірність зображення неперервного розподілу температури на плоскій поверхні співпадає із 2D виміром самої поверхні. 3D вимір кольорового відображення неперервного розподілу скалярної величини, температури, по криволінійній (3D) поверхні - також співпадають розмірностями.

Гідростатичний тиск – неперервна скалярна величина нульового виміру – діє безпосередньо на кожну точку самої поверхні, і, фізично, не вимагає додаткового виміру. По аналогії із температурою, величину тиску можна було би позначити відповідним кольором на поверхні. Друга основна властивість гідростатичного тиску – дія нормально направлена на поверхню – вимагає використовувати позначення тиску рідини на точку поверхні у вигляді розмірної направленої «лінії зі стрілочкою». У такий спосіб для зображення об'єму епюри гідростатичного тиску використано додатковий 1D вимір з одиницею розмірності (Па) для позначення величини тиску. Окрему ортогональну вісь використано для відображення розмірної величини тиску на кожну точку поверхні.

Вимір епюри гідростатичного тиску на плоску 2D поверхню складає: «площа 2D поверхні, ω , розмірність $[m^2]$ » + «1D вимір для всіх ортогональних напрямлених тисків, одиниця тиску $[Pa]$ » = «3D епюри, координати (x, y, z) , розмірність по координатах $[m, m, Pa]$, розмірність епюри $[H]$ ». Форма епюри обмежена безпосередньо самою плоскою поверхнею і гранями та поверхнями, які утворюють гідростатичний тиск на всі точки поверхні (рис. 3).

3D зображення віртуального, не існуючого в реальності, умовного зображення епюри гідростатичного тиску на плоску поверхню в нашому звичному 3D просторі умовно-коректно віддзеркалює всі особливості неперервного розподілу дії (нормальної напруги, або тиску) суцільного середовища на плоску поверхню.

Спробуємо з'ясувати, чому використання метода зображення епюри тиску є досить умовним прийомом. Епюра гідростатичного тиску штучно доповнена додатковими віртуальними властивостями:

- додатковий вимір для зображення величини і напрямку тиску, і, як наслідок, набуває віртуальний об'єм;

- центр ваги епюри тиску, як наслідок, розташовано в об'ємі самої епюри і на відстані від точки дії сумарної сили тиску, яка в реальності розташована безпосередньо в площині поверхні.

Для повернення із віртуального тривимірного, досить умовного, зображення епюри, ми проектуємо по нормалі центр ваги об'ємної епюри тиску на саму двовірну поверхню. У такий спосіб ми знаходимо координату точки дії сумарної сили тиску на плоску поверхню. А відносно цієї точки розраховуємо величину центра тиску h_D . У такий спосіб ми робимо перехід від центру ваги віртуальної тривимірної епюри до точки дії вектора сили гідростатичного тиску на поверхні. В реальності вся дія, тобто тиск рідини, відбувається в площі двовимірної плоскої поверхні, а вимушена об'ємність епюри та «боротьба» із цією штучно набутою властивістю – є власноруч побудована «доповнена реальність» і додаткові мета-розрахунки.

Простота і наочність відображення 3D епюри в звичному для людини 3D просторі дозволяє практично не помічати:

- заміну реальної 2D задачі гідростатичного тиску на плоску поверхню віртуальним 3D образом епюри;
- трьох характеристик вектора сили гідростатичного тиску – **величина, точка прикладання і напрямок дії**, які розраховуються через відповідні геометричні параметри 3D епюри: **об'єм, центр ваги і форму**;
- фінальний перехід від віртуального 3D образу до нашої реальної 2D задачі шляхом ортогональної проекції центра ваги на реальну плоску 2D поверхню.

У такий спосіб ми долаємо відстань між центром ваги усередині віртуальної умовної 3D епюри і реальною координатою точки прикладання умовного рівнодіючого вектора сили гідростатичного тиску безпосередньо на самій 2D поверхні.

Для плоскої задачі за кадром залишається такий важливий момент, що віртуальна форма епюри однозначно визначає напрямок дії вектора сили гідростатичного тиску. Маючи систему паралельних векторів сили тиску на всі елементи плоскої 2D поверхні [1], ми автоматично зводимо систему паралельних нормально направлених сил гідростатичного тиску на окремі складові прошарки поверхні до нормально направленої рівнодіючої сили. Напрямок, або кут $\angle\varphi$ в загальноприйнятій нотації, для плоскої поверхні однозначно визначається на початку самої задачі формами поверхні і епюри тиску.

Універсальний метод K123 базується на аксіомі, що епюра гідростатичного тиску наслідуює всі властивості суцільного середовища. Мета-розрахунки геометричних властивостей епюри гідростатичного тиску – об'єму, центру ваги і характеристики форми – дозволяють визначити всі параметри рівнодіючого вектора гідростатичного тиску і узагальнити використання методу K123 для розрахунку на 3D поверхні довільної форми.

Спробуємо оцінити вимір епюри гідростатичного тиску на криволінійну 3D поверхню, яка має вертикальну осьосиметричну (z) "твірну" криволінійну лінію і пряму "напряму", яка паралельна осі (y) (рис. 4). Вимір криволінійної поверхні дорівнює кількості координат, які визначають кожну точку поверхні і дорівнює (x, y, z) – 3D. Одиницею розмірності площі поверхні ω залишається – розмірність площі, $[m^2]$. Аналогічно, необхідно додатково виділити 1D вимір для тиску p , з одиницею розмірності $[Pa]$.

тиск	елемент поверхні твірна	напрямуюча	3D поверхня	4D епюра в 3D просторі	3D проекція 4D епюри	
p						
0	1	2	3	4	4 / 3	вимір
Па	м	м	m^2	$m^2 \cdot Pa = H$	"об'єм епюри" / Н	одиниці(СИ)
-	(x)	(x, z)	(x, y, z)	(x, y, z, m)	(x, y, z, m)	координати
-	①D	②D	③D	④D	④D / ③D	умовні позначення виміру елемента
-	-	-	-	④D→③D	④D→③D / -	проекція елемента на простір

Рис.4. Вимір епюри гідростатичного тиску на криволінійну поверхню

Вимір епюри гідростатичного тиску на криволінійну 3D поверхню складає: «3D поверхні (x, y, z) , одиниці розмірності $[m, m]$ » + «1D вимір для тиску, одиниця розмірності $[Pa]$ » = «4D вимір епюри, одиниці розмірності об'єму $[m, m, Pa]$ ». Форма епюри обмежена безпосередньо самою криволінійною поверхнею і, як мінімум для ізоморфної рідини, додатково одною гранню і двома поверхнями, які утворює гідростатичний тиск на всі елементи поверхні (рис. 5).

Ми отримали розмірність об'єму епюри тиску як добуток розмірності площі криволінійної поверхні по трьом координатам (x, y, z) відповідно – $\omega, [m^2]$ на розмірність четвертої координати, яка призначена для нормально (ортогонально) спрямованого тиску p , $[Pa]$. Об'єм епюри в ортогональній 4D системі координат вимірюється в одиницях сили $(m \cdot m \cdot Pa = H) - P, [H]$.

Збільшення масштабу тиску p , одиниця розмірності [Па], по осі (y) не змінює трикутну форму перерізу епюри тиску на плоску поверхню (рис. 5 а,б). Зміна масштабу по осям, наприклад (x, y) (рис. 5 в), також не змінює призматичну форму епюри тиску (рис. 5 в). Напрямок зміни масштабу показано додатковими стрілками на рисунку 5 б для перерізу, і рисунку 5 в – аксонометричне зображення.

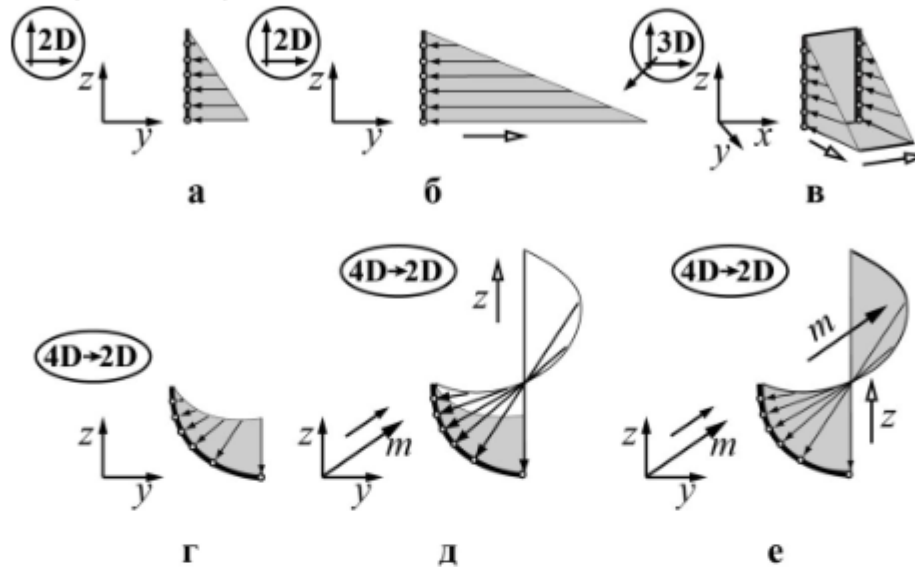


Рис.5. Масштаб і форма епюри гідростатичного тиску на плоску та криволінійну поверхні:

а – переріз епюри тиску на плоску поверхню; **б** – зміна масштабу по осі y ; **в** – аксонометрія 3D епюри; **г** – переріз 3D проекції 4D епюри тиску на криволінійну поверхню в площині (z, y); **д** - зміна масштабу (четвертий вимір – тиск) по осі m і два перерізу проекції епюри до (та після) масштабування в площині (z, y); **е** – переріз проекції епюри в площині (z, y) після збільшення масштабу по осі m

Переріз епюри тиску на криволінійну поверхню в площині (z, y) до збільшення (рис. 5 г), при збільшенні (рис. 5 д) і після збільшення масштабу тиску по осі четвертого виміру (m) суттєво міняє форму. Напрямок зміни форми 3D перерізу в площині (z, y) проекції 4D епюри тиску (x, y, z, m) показано додатковими стрілками (рис. 5 д,е).

Для коректного відображення всієї поверхні закрученого 3D перерізу 4D епюри в 2D площині (z, y) не вистачає додаткового виміру в нашому звичайному 3D просторі.

3D вимір зайняла криволінійна поверхня і 1D вимір вимагає нормально (ортогонально) спрямований до поверхні тиск. Однозначно визначена властивість рідини про ортогональній напрямку гідростатичного тиску на поверхню дає нам підставу припустити існування 4D вимірної об'ємної епюри. З позиції аксонометричної візуалізації, уявити суцільну об'ємну 4D епюру гідростатичного тиску на криволінійну поверхню, яка має ізоморфні до рідини властивості, в нашому звичайному 3D вимірному просторі неможливо.

Нагадаємо, *додатковий віртуальний* (тобто – не існуючий в реальності) вимір епюри тиску отримано нами через зображення скалярної величини тиску у вигляді 1D вимірного вектороподібного зображення. Такий штучний прийом визначення величини тиску через об'ємну розмірну складову епюри має умовний зв'язок з реальним тиском рідини, який діє безпосередньо на саму поверхню і в площині поверхні.

В роботі «Критическая история общих принципов механики» Е. Дюринг [17] писав «...при таком воззрении на математические штудии, в конце концов, точкою зрения мерила является даже не математика сама по себе, в своей изолированности, но как механика и физика составляют первую действительность природы, то об их потребностях прежде всего следует позаботиться. С точки зрения практики, в этом нет ни малейшего сомнения...». Штучно створена проблема з додатковим віртуальним виміром епюри тиску на криволінійну поверхню при розробці інженерних методів розрахунку легко долається класичними методами обчислення нескінченно-малих.

Фрагментарно форму і об'єм 4D епюри ми маємо можливість представити в нашому 3D вимірному просторі, використовуючи методики аксонометричного зображення апроксимації нашої віртуальної 4D епюри елементарними 3D формами – куб, циліндр, сфера, тор (далі, «примітивами», за термінологією програм 3D моделювання). Розрахункова схема універсального метода трьох команд K123 базується на класичних методах вищої математики, які було розроблено в XVIII столітті Ньютоном, Лейбницем і удосконалено Ейлером та ін. в основі яких практичні розрахункові прийоми обчислення нескінченно-малих.

В якості нескінченно-малої величини ми будемо використовувати величину, яка має певні фізичні розміри. Приклади апроксимації криволінійної поверхні плоскими горизонтальними елементами та розрахунки інженерних задач наведено в роботі [2]. Саме такий метод, коли нескінченно-мала величина має певні фізичні розміри, використовують фізики, щоб побудувати наочне наближення до реальної фізичної моделі. І саме такий метод дозволить нам обґрунтувати використання універсального чисельного розрахунку прикладних інженерних задач методом K123.

Для фрагментарного відображення форми і об'єму 4D епюри апроксимуємо криволінійну поверхню неперервною послідовністю сегментів

із елементарних плоских горизонтальних прошарків на прикладі трикутної криволінійної поверхні (рис.6 г).

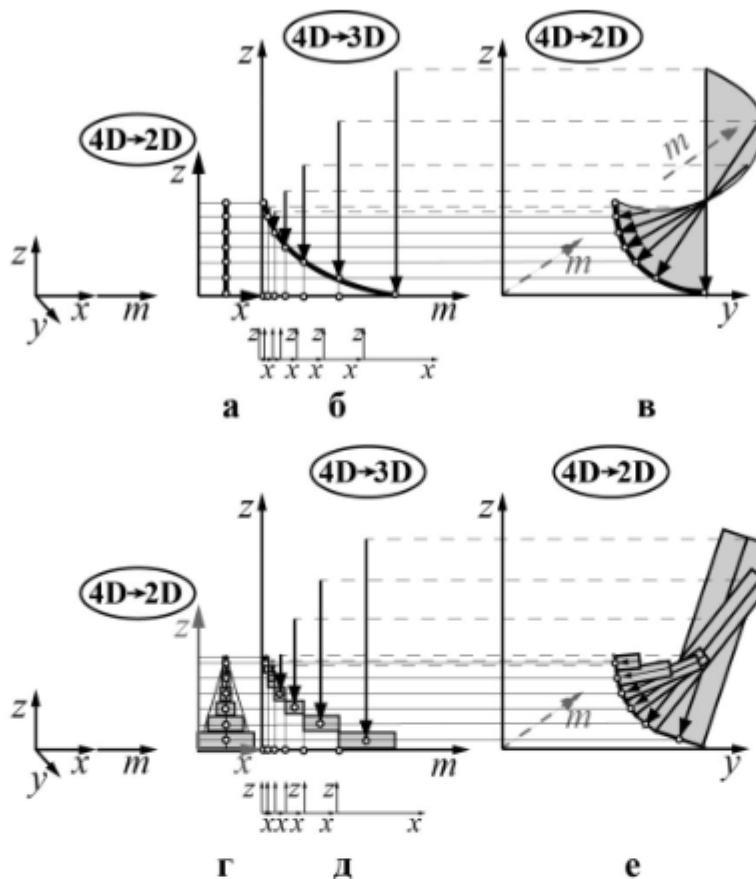


Рис.6. Четвертий вимір епюри гідростатичного тиску на криволінійну поверхню:

а – проекція «твірної» поверхні в площині (z, x) ; **б** – умовна проекція «твірної» поверхні в площині четвертого виміру (z, m) , ортогональні напрямки (x, m) штучно об'єднано; **в** – переріз 4D епюри в площині (z, y) ; **г, д** – проекція шарів змоченої поверхні в площинах: (z, x) та умовно об'єднаної (z, x, m) ; **е** – перерізи складових елементів епюри тиску на апроксимуючі горизонтальні плоскі шари поверхні в площині (z, y)

Проекція поверхні в площині (z, x) – трикутник, в площині (z, y) – дуга чверті кола (рис.5 г). Малий розмір і необмежена кількість плоских апроксимуючих сегментів дозволить нам проводити інженерні розрахунки з наперед заданою точністю. Для простоти, форма криволінійної поверхні осьосиметрична і має тільки одну криволінійну «напряму» (рис.5 г; рис. 6 а; рис. 7 м) з прямою «напрямою» паралельною осі x (рис. 7 м).

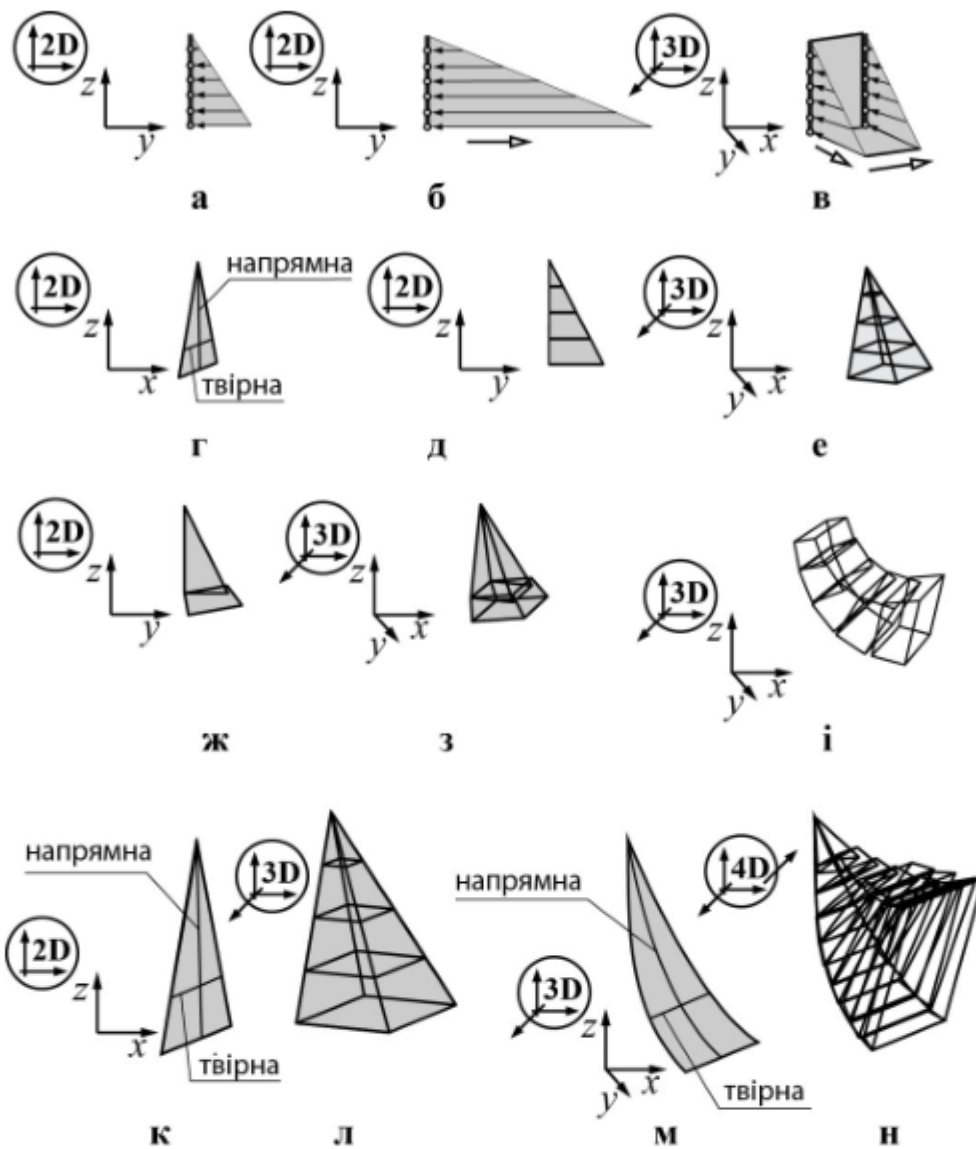


Рис.7. Вимір епюри гідростатичного тиску на плоску та криволінійну трикутні поверхні:

а, б, д – переріз епюри тиску на плоску поверхню; **в, г** – плоска прямокутна і трикутна поверхні; **в, е** – аксонометрія 3D епюри; **ж** – переріз проекції 3D епюри тиску на двосегментний плоский трикутник в площині (z, y) ; **з** – аксонометрія двох елементів 3D епюри; **и** – аксонометрія елементів 3D епюри тиску на плоскі горизонтальні апроксимуючі шари елемента криволінійної поверхні; **ж, л** – плоска трикутна поверхня і відповідна 3D епюри тиску; **м, н** – криволінійна трикутна 3D поверхня і відповідна проекція 4D епюри на 3D простір (x, y, z)

Приклади 3D епюри (рис.7 е) для плоскої трикутної 2D поверхні (рис.7 г) та 4D епюри (рис.7 н) для криволінійної трикутної 3D поверхні (рис.7 м) наведено на відповідних рисунках.

Розрахунок об'єму і центру ваги окремих елементів епюри тиску на сектори трикутної поверхні (рис. 7 ж,з) дозволяє визначити величину

напрямок дії і центр тиску рівнодіючої сили тиску на всю трикутну поверхню. Для спрощення обрано осьосиметричну в площині (x, z) трикутну поверхню з прямою (рис. 7 к) і криволінійною (рис. 7 м) «напрямами» і прямими «твірними».

Ламана «напрямна» (рис. 7 ж) утворює 3D сегментну плоску поверхню із 3D сегментною епюрою тиску. Перетинання окремих складових елементів епюри (рис. 7 з) не змінює їх властивості, які ізоморфні властивостям суцільного нестисливого середовища. Враховуючи віртуальний характер перетинання окремих складових елементів епюри (рис. 6, з), ми маємо можливість окремо розраховувати складові елементи епюри тиску. На заключному етапі приводимо систему осьосиметричних непаралельних сил до рівнодіючої сили тиску на всю 3D поверхню, яка утворена плоскими сегментами [2].

В загальному вигляді набір апроксимуючих елементів епюри тиску на довільний елемент криволінійної поверхні має аналогічне зображення (рис. 7 і). Форма і положення в просторі кожного складового елемента епюри гідростатичного тиску на окремі шари плоскої поверхні (рис. 7 ж,з,л) або криволінійної (рис. 6 е; рис. 7 і,н) залишаються незмінними. Аналітичні і чисельні алгоритми метода трьох команд K123 з прикладами і розрахунками представлено в роботах автора [1,2].

Криволінійна 4D епюра тиску представлена варіантами: у вигляді апроксимації елементарними 3D «примітивами» - «усіченими призмами» в площині (x, y, z) (рис. 7 н); або, як спрощений варіант, «паралелепіпедами» з 2D проєкціями на осі (y, z) у вигляді прямокутників (рис. 6 е).

Апроксимація криволінійної 4D епюри тиску елементарними 3D «примітивами» - паралелепіпедами – спрощує чисельні розрахунки і не обмежує точність отриманих результатів. Оцінка точності розрахунків за методом K123 наведена в роботах автора [1, 2].

Об'єднаємо осі (x, m) для наочного відображення всіх складових апроксимуючих елементів 4D епюри тиску (x, y, z, m) на 3D криволінійну поверхню (x, y, z) , яка для простоти зображення має осьосиметричну форму в площині (y, z) . Кожна точка на осі (x) (точки на «напрямної» лінії поверхні, рис. 6 а) має необмежену кількість відповідних точок по осі (m) (кожна точка на «напрямної» має додатковий вимір по сумісній осі (x, m) , рис. 6 б). У такий спосіб кожній точці «напрямної» (рис. 6 г) відповідає певної ширини горизонтального прошарок поверхні, а його величина визначається по осі (m) (рис. 6 д). Іншими словами, вісь (x) використано два рази: перший раз задано координату положення точки на лінії «напрямної», і повторно

використано даний ортогональний напрямок для визначення розмірів ширини відповідних горизонтальних прошарків поверхні (рис. 6 д).

У такий спосіб ми штучно «розтягнемо» в 3D просторі окремі апроксимуючі прошарки поверхні (рис. 6 д), щоб відповідні 3D об'ємні елементи епюри (рис. 6 е) не перетиналися, що дає нам можливість виміряти площу «розкрученої» апроксимованої проекції в площині (y, z) (рис. 5 і; рис. 6 е), яка складається з площі перерізів апроксимуючих примітивів (рис. 6 е). Відома ширина горизонтальних прошарків поверхні (рис. 6 г) і відповідні площі перерізів апроксимуючих елементарних епюр (рис. 6 е) дозволяють визначити загальну форму, положення, об'єм, координати центра ваги всіх складових елементів 4D епюри тиску.

АксонOMETричне зображення елементів 4D епюри тиску (x, y, z, m) на криволінійну трикутну поверхню відтворено в програмі MAYA Autodesk (рис. 8). АксонOMETричне зображення апроксимації криволінійної 4D епюри тиску для криволінійної трикутної поверхні представлено на рисунку 9.

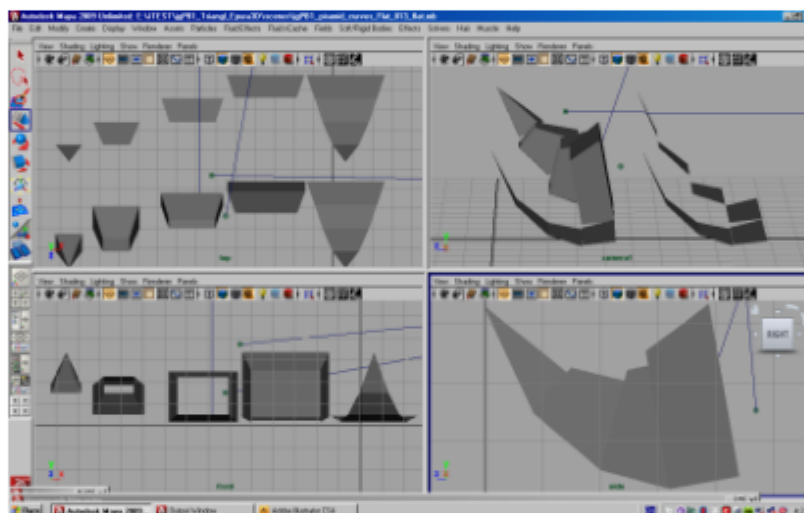


Рис.8. Апроксимація криволінійної 4D епюри тиску елементарними 3D «примітивами» в програмі MAYA Autodesk

Мета-розрахунки вищезначених основних геометричних параметрів – об'єм, центр ваги і напрямок дії для вектора сили тиску через складові елементи загальної форми 4D епюри дозволяють визначити всі параметри гідростатичного тиску на криволінійну поверхню довільної форми. В певній мірі штучні правила побудови віртуальної епюри тиску, а саме додатковий четвертий вимір в конструкції епюри через векторне відображення сили тиску, примушує нас проводити мета-розрахунки геометричних параметрів чисельними методами.

Далі, в звичайній 3D системі координат вирішуючи систему рівнянь, які описують вектор сили тиску і рівняння вертикальної осьосиметричної

«твірної» нашої поверхні, ми повертаємось до реальної координати точки дії рівнодіючої на поверхні.

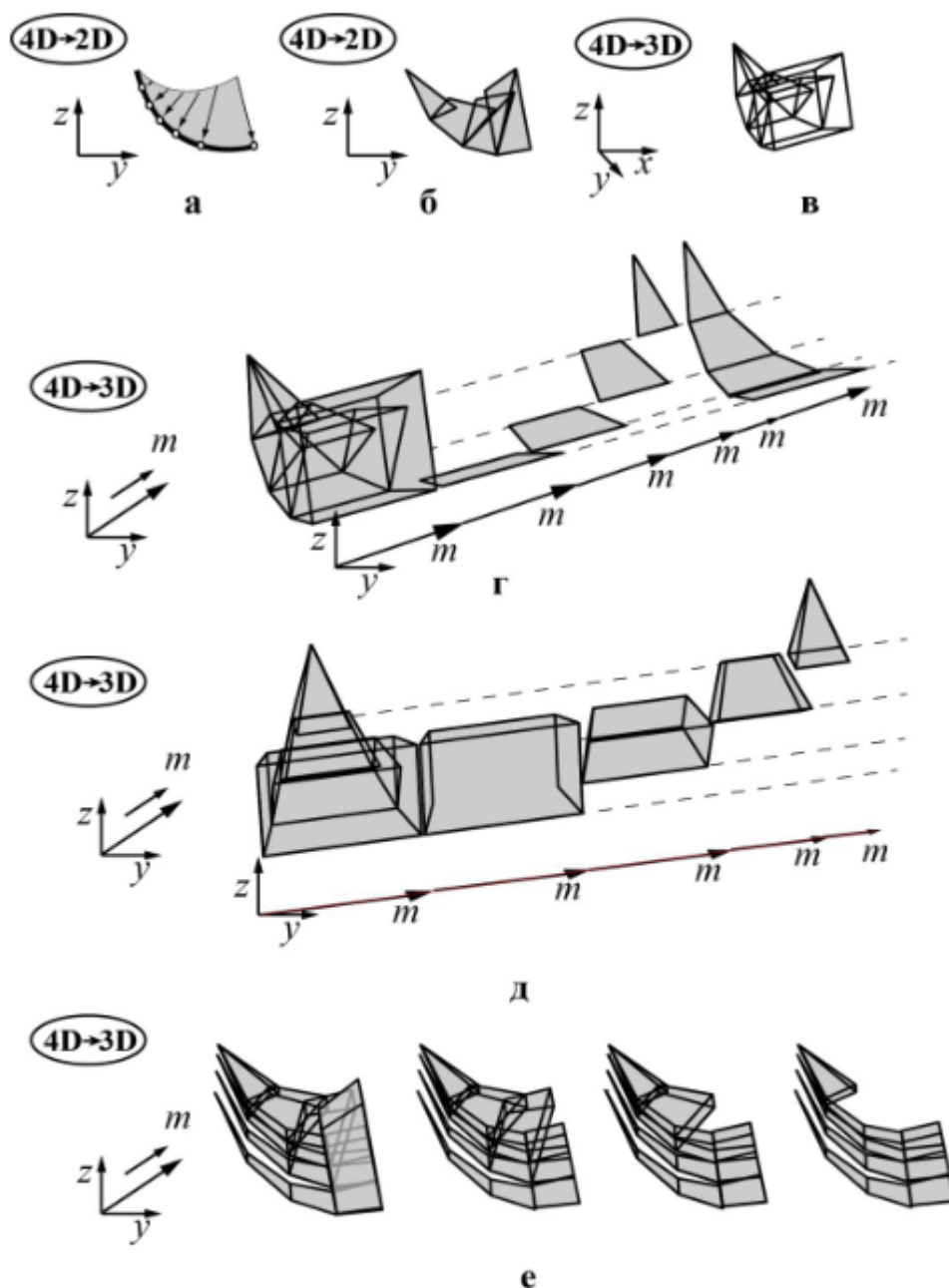


Рис.9. Аксонометричне зображення апроксимації криволінійної 4D епюри тиску елементарними 3D «примітивами» в програмі MAYA Autodesk:

а – переріз епюри тиску на криволінійну поверхню; **б** – переріз апроксимованої епюри тиску на криволінійну поверхню; **в** – аксонометрія апроксимованої 4D епюри; **г** – плоскі апроксимуючі горизонтальні шари поверхні в штучному 4-му вимірі по осі (m); **д** – аксонометрія 3D апроксимуючих складових елементів 4D епюри в штучному 4-му вимірі по осі (m); **е** – аксонометрія набору 3D апроксимуючих складових елементів 4D епюри, вигляд збоку

Іншими словами, ми здійснюємо перехід із центра тиску об'ємної віртуальної $4D$ епюри до реальної фізичної точки на самій поверхні. Нагадаємо, що тиск рідини відбувається безпосередньою на кожну точку поверхні, і не існує у віртуальному об'ємі епюри на певній відстані від поверхні.

З метою подолання набутої віртуальної розбіжності, методом K123 розраховується величина, кут і ортогональні проекції вектора сили тиску з координатами, що належать точці поверхні кожного елементарного горизонтального апроксимуючого прошарку. Ми ітераційно розраховуємо координату дії складової сили тиску в точці, де вона безпосередньо діє на сам елемент поверхні. У такий спосіб ми отримуємо систему паралельних ортогональних проекцій сили тиску з координатами на самій поверхні, яку зводимо методом K123 до рівнодіючої. Всі означені розрахунки для кожного прошарку проводяться в одній стандартній ітераційній процедурі. Кожний раз ми працюємо з реальними координатами криволінійної поверхні [2].

Висновки

В основу метода трьох команд K123 покладено аксіому, що властивості геометричної фігури (епюри гідростатичного тиску) подібні (ізоморфні) властивостям досліджуваного явища – гідростатичному тиску рідини на поверхню.

Епюра тиску на плоску двовірну ($2D$) поверхню має три виміри ($3D$). Епюра тиску на криволінійну тривимірну ($3D$) поверхню має чотири виміри. $4D$ форма та об'єм епюри тиску не може бути коректно відображено в проекціях на $3D$ простір в звичайних координатах (x, y, z) .

Загальний вигляд $4D$ епюри тиску можливо відображати дискретними апроксимуючими елементарними «примітивами» (наприклад, паралелепіпедами) в координатах (x, y, z, m) , шляхом штучного об'єднання одного ортогонального напрямку для двох координат (x, m) .

Аналітичні і чисельні розрахунки методом трьох команд K123 проводяться в звичайному $3D$ просторі і системі координат (x, y, z) . Площа плоских апроксимуючих горизонтальних шарів поверхні, координата положення центра тиску і ракурс (поворот) розраховуються за аналітично заданим рівнянням поверхні $f(x, y, z)$. Об'єм епюр тиску на елементи поверхні визначаємо множенням скалярної величини тиску в центрі ваги горизонтального шара поверхні на його площу.

Віртуальний об'єм $4D$ епюри тиску на зовнішню або внутрішню сторону криволінійної поверхні залишається постійним. Висновок базується на загальних властивостях рідини - величина гідростатичного тиску

не залежить від орієнтації поверхні. Площа і форма поверхні для симетричної задачі – **величина стала**. Об'єм епюри і, відповідно, модуль рівнодіючої сили тиску – однакові.

Універсальний метод розрахунку K123 дозволяє визначити *геометричні параметри* апроксимуючих *елементів епюри* тиску – **об'єм, центр ваги і положення в просторі**, що відповідно визначає **величину, точку дії і напрямок вектора сили тиску** на кожний шар поверхні. Отримана система векторів сили тиску через їх ортогональні проєкції методом K123 приводиться до рівнодіючої сили.

Список літератури

1. *Копаниця Ю.Д.* Комп'ютерний розрахунок сили тиску. Універсальний алгоритм трьох команд – K123. // Наук.-техн. зб. "Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки". – К.: КНУБА, 2012. – Вип.18. – С.148–163.
2. *Копаниця Ю.Д.* Розрахунок гідростатичного тиску на криволінійну поверхню. Універсальний алгоритм трьох команд – K123. // Наук.-техн. зб. "Проблеми водопостачання, водовідведення та гідравліки". – К.: КНУБА, 2012. – Вип.20. – С.105–119.
3. *Виттенбауэр Ф.* Сборник задач по гидромеханике: (Жидкости и газы). – Санкт-Петербург: М.О. Вольф, 1912. – 382 с.
4. *Горчин Н.К.* Гидравлика в задачах / Н.К. Горчин, М.Д. Чертоусов. – Л.: Кубуч, 1927. – 430 с.
5. *Агроскин И.И.* Гидравлика / Г.Т. Дмитриев, Ф.И. Пикалов. – М.: ГосЭнергИздат, 1950. – 440 с.
6. *Богомолов А.И.* Гидравлика. Учебник для вузов / А.И. Богомолов, К.А. Михайлов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. Стройздат., 1972. – 648 с.
7. *Сборник задач по машиностроительной гидравлике* / Под ред. И.И. Куколевского, – 3-е изд., перераб. и доп. – М: Машиностроение, 1972. – 472 с.
8. *Чугаев Р.Р.* Гидравлика. Учебник для вузов. – Л.: Энергия, 1975. – 600 с.
9. *Справочник по гидравлике* / Под ред. В.А. Большакова, – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1984. – 343 с.
10. *Константинов Ю.М.* Технічна механіка рідини і газу: підручник / Ю.М. Константинов, О.О. Гіжа. – К.: Вища шк., 2002. – 277 с.
11. *Гиргидов А.Д.* Механика жидкости и газа (гидравлика): Учебник для вузов. 3-е изд., исп. И доп. – СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2007. – 545 с.
12. *Featherstone R.E., Nalluri C.* Civil engineering hydraulics. Essential theory with worked examples. Third edit. – Oxford.: Blackwell Science Ltd, 1995. – 401 p.

13. *Brater E. F., King H.W.*, Handbook of hydraulics for the solutions for hydraulic engineering problems. Seventh edit. – New York.: McGraw-Hill Companies, Inc, 1996. – 624 p.

14. *Malvyn Kay* Practical hydraulics. Second edit. – London: Taylor&Francis gr., 2008. – 253 p.

15. *Dawie Han* Concise hydraulics. – Ventus Publishing ApS, 2008. – 177 p.

16. *Рендалл Л.* Закрученные пассажи: Проникая в тайны скрытых размерностей пространства. – М.: Издательство ЛКИ, 2011. – 397 с.

17. *Е. Дюринг* Критическая история общих принципов механики: Пер. с нем. Изд. 2-е. – М.: КРАСАНД, 2011. – 552 с.