

УДК 532.5

Волк Любов Романівна, к.т.н., доцент

Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне, Україна

Аналіз розвитку підходів до побудови профілів осередненої швидкості потоку при турбулентному режимі в трубопроводах

Анотація. В статті приведено аналіз літературних джерел щодо розвитку теорії руху потоку та побудови профілів осередненої швидкості в трубопроводах при турбулентному режимі. Вперше на основі Коші-Гельмгольдца розглянуто профіль осередненої швидкості як поступальний рух рідких часток

Ключові слова: профіль осередненої швидкості, турбулентний режим, трубопроводи.

В сучасних умовах спостерігається розвиток галузі гідроенергетики, теплоенергетики, гідротехнічного будівництва в Україні. Для підвищення ефективності і надійності такого роду об'єктів, виникає необхідність удосконалення підходів до гідравлічного розрахунку трубопроводів, а саме розвиток теорії кінематичної структури потоку в них.

Одним з перших видатних вчених 19 століття є С. Нав'є, який займався розробкою теоретичних основ руху реальних рідин, ввівши у рівняння Л. Ейлера додаткові члени для врахування дотичних напружень, які виникають при наявності градієнта швидкості.

У 1845 році Дж. Стокс отримав рішення цього рівняння при малих діаметрах труб та швидкостях потоку. Але зазначив, що при великих діаметрах труб і значних витрат рідини виявилася різка розбіжність теоретичного розрахунку з експериментальними вимірюваннями швидкості, цю розбіжність він пояснив присутністю вихрових рухів, що змінюють характер руху потоку.

У свою чергу, розглядаючи цей процес, Ж. Буссінеск у 1877 році висловив припущення про те, що у встановленому при великих витратах рідини новому режимі течії, вирішальну роль відіграє не звичайна молекулярна в'язкість, а значно більша, ефективна.

О. Рейнольдс у 1895 році розробив підхід для статистичного опису турбулентних течій, розділивши гідродинамічні характеристики на осереднені та пульсаційні, й склав рівняння турбулентного руху рідини, що в подальшому отримали назву рівняння Рейнольдса [1,2]. Але одним з основних недоліків вищезгаданих рівнянь є те, що вони незамкнуті і не дозволяють вирішувати конкретні завдання без додаткових умов.

За теоремою Коші-Гельмгольдца рух рідкої часточки можна розкласти на поступальний, обертовий та деформаційний.

Незважаючи на велику кількість робіт в зазначеному напрямі рішення цієї проблеми залишалось невирішене.

В подальшому І. Нікурадзе, Ф.О. Шевельов, І.К. Нікітін займалися питаннями дослідження режимів руху потоку, гідравлічного опору в трубах та кінематичної структури [3,4].

Грунтовні експериментальні дослідження у вивченні режимів руху потоку в трубопроводах з однорідною зернистою шорсткістю і гідравлічногладких трубах та розподілі осереднених швидкостей було виконано І. Нікурадзе. Також Ф.А. Шевелев в лабораторних умовах на гідравлічних та аеродинамічних установках дослідив режими руху потоку та розподіл швидкостей в сталевих та чавунних трубопроводах.

На даний час широко застосовується логарифмічний закон розподілу осереднених швидкостей Л. Прантля (Рис. 1), але при цьому він не відповідає граничним умовам на осі трубопроводу та біля стінки.

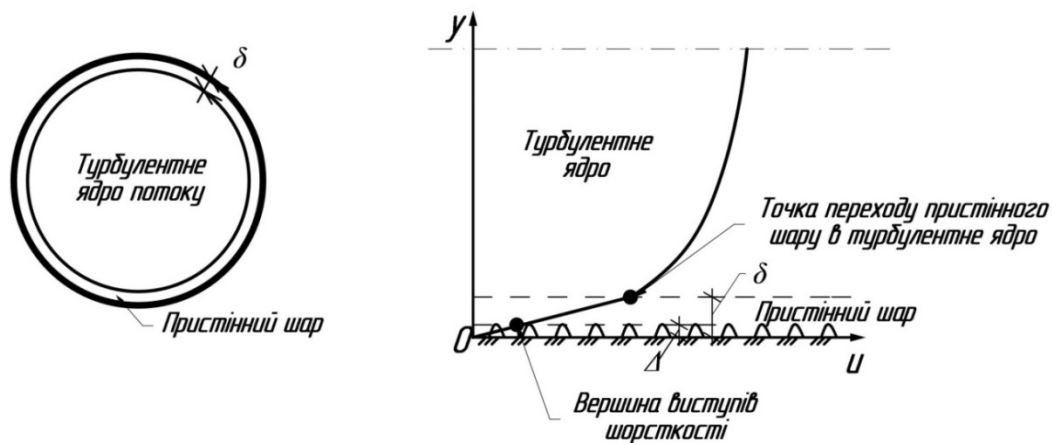


Рис. 1 – Двошарова модель руху потоку

Формула профілю швидкостей за логарифмічним законом розподілу Л. Прандтля має наступний вид

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{u_* y}{\nu} + C, \quad (1)$$

де u_* - динамічна швидкість, м/с; y - відстань від внутрішньої поверхні труби до координати з осередненою швидкістю u , м; κ - універсальна постійна Прандтля, встановлюється експериментально; ν - кінематична в'язкість, м²/с; C - стала величина.

Залежність (1) справедлива для турбулентного ядра, а для пристінного шару залежність для побудови профілю швидкостей має наступний вигляд

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_* y}{\nu}. \quad (2)$$

Двошарова математична модель Л. Прандтля була прийнята за основу багатьма вченими і досі широко використовується, але при цьому вона не відповідає граничним умовам на осі трубопроводу та біля стінки.

Пізніше на основі проведених експериментальних досліджень профілю швидкостей І. Нікурадзе доповнив закон Л. Прандтля та запропонував наступну залежність зі змінними коефіцієнтами

$$\frac{u}{u_*} = A \ln \frac{u_* y}{\nu} + B. \quad (3)$$

де A і B - коефіцієнти.

Для гладких труб різного діаметра він встановив, що невідомі коефіцієнти A і B незмінні та мають значення

$$\frac{u}{u_*} = 5,75 \lg \frac{u_* y}{\nu} + 5,5. \quad (4)$$

Для шорстких труб ним була запропонована наступна залежність

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y}{\Delta} + 8,48. \quad (5)$$

де Δ - висота виступів шорсткості, м.

Двошарова математична модель Прандтля була прийнята за основу багатьма вченими і досі широко використовується, але при цьому вона не відповідає граничним умовам на осі трубопроводу та біля стінки.

Дослідженням теорії пристінного шару займалися такі видатні вчені як В. Толмін, Л. Прандтль, М.А. Великанов, В.Ф. Дюренда, Х.Л. Драйдена, Г. Шліхтінг та ін.

Труднощі, які пов'язані з отриманням залежностей для розподілу осереднених швидкостей на основі напівемпіричних моделей турбулентності, зумовили появу значної кількості емпіричних залежностей. Ці залежності ґрунтувалися на апроксимації безпосередньо вимірних величин, таких як швидкості та пульсації. Такими дослідженнями займалися такі видатні вчені як: А. Фейдж, Х. Тауненд та ін. Отримані на основі різних моделей розрахункові залежності виявляють значну кількісну, а іноді і якісну, відмінність один з одним і з експериментальними даними.

У 1980 році І.К. Нікітін [5] запропонував універсальну двошарову модель турбулентного руху. Згідно двошарової моделі турбулентного руху І.К.Нікітіна, так як і в моделі Прандтля, в потоці існує пристінний шар товщиною δ з лінійним розподілом швидкостей та логарифмічний профіль турбулентного ядра (рис. 1). Ці шари мають спільну умовну точку переходу з пристінного шару в турбулентне ядро.

Використовуючи метод фото-відео зйомки, І.К. Нікітін привів емпіричні залежності для визначення пульсаційних швидкостей, які розкривають структуру потоку.

Профіль швидкості для пристінного шару він запропонував визначати за приведеною нижче залежністю

$$u = u_{*\delta} Re_{*\delta} \frac{y}{\delta}, \quad (6)$$

$$\text{для турбулентного ядра} \quad u = u_{*\delta} Re_{*\delta} \left(1,151g \frac{y}{\delta} + 1,5 - 0,5 \frac{\delta}{y} \right), \quad (7)$$

де $Re_{*\delta}$ - коефіцієнт пропорційності, що визначає товщину пристінного шару.

Одним з недоліком універсальної двошарової моделі турбулентного руху є неврахування граничних умов на осі трубопроводу. Також приймати лінійний розподіл осереднених швидкостей у пристінному шарі (ламінарний режим) є некоректно.

На основі проведених теоретичних досліджень, використовуючи експериментальні дослідження І. Нікурадзе та Ф.О. Шевельова, запропонована формула для побудови профілю осередненої швидкості, який за теоремою Коші-Гельмгольца відображає поступальний рух рідких часток [1]

$$u = \frac{\nu Re^2 (r_0^2 - r^2)}{64 \left((k Re)^{1/m} (r_0^n - r^n) + r_0^n \right)^m r_0}, \quad (8)$$

де k , m і n - параметри, які визначаються координатами точки $(\lg Re; \lg(100\lambda))$ на графіку Нікурадзе для якої будується профіль осередненої швидкості; Re - число Рейнольдса; r_0 – внутрішній радіус трубопроводу, м; r – відстань від осі трубопроводу до точки, в якій визначається осереднена швидкість часточки потоку u .

На основі узагальнюючих результатів дослідження кінематичної структури потоку в трубопроводах вищезгаданих вчених розвинуто теорію турбулентності, шляхом усунення основних недоліків розроблених напівемпіричних теорій, розкрито зв'язок між режимами руху рідини та їх кінематичною структурою з урахуванням теореми Коші-Гельмгольца, за якою рух рідкої часточки розкладається на поступальний, обертовий та деформаційний рух. Це дасть змогу удосконалити підхід до гідромеханічного розрахунку потоку в трубопроводах, який буде представлений в наступних статтях.

Список використаних джерел

1. *Хлапук М. М., Мошинський В. С., Безусяк О. В., Волк Л. Р.* До розвитку теорії руху потоку в трубопроводах при турбулентному режимі // Вісник НУВГП. Технічні науки : зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2019. – Вип. 3(87). – С. 3-18.
2. *Лойцянский Л. Г.* Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский.– М.: Наука, 1978.– 736 с.
3. *Nikuradse J.* Gesetzmässigkeiten der turbulenten Strömung in glatten Röhren / J. Nikuradse. – Forsch. Arb. Ing. Wes., 1932. – N. 356. 4. *Nikuradse J.* Strömungsgesetze in rauchen Röhren / J. Nikuradse // Forsch. Ver. Dtsch. Ing. – 1933. – N. 361.
4. *Шевелев Ф.А.* Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах / Ф.А. Шевелев. – М.: Госстройиздат., 1953. – 208 с.
5. *Никитин И.К.* Сложные турбулентные течения и процессы тепломассопереноса / И.К. Никитин. – К.: Наук. думка, 1980. – 240 с.