

СЕКЦІЯ ГІДРАВЛІКИ, ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ВОДОВІДВЕДЕННЯ

УДК 628.14

*О.І. Гузинін, к.т.н., доцент
Д.А. Шаренко студент гр. 501БВ
Полтавський національний технічний
університет імені Юрія Кондратюка*

ДИСПАЦІЯ ЕНЕРГІЇ РІДИНИ В КРУГЛОЦИЛІНДРИЧНІЙ ТРУБІ

У природі існують два абсолютно різних види руху рідин і газів. Плавний, спокійний рух – ламінарний рух. І рух, при якому основні гідродинамічні параметри швидкість, тиск, температура і ін. схильні до хаотичних пульсацій, нерегулярно змінюються в часі і просторі – турбулентний рух. Існування двох видів руху було відомо давно (Г. Хаген, Д.І. Менделєєв).

Однак теорія турбулентності з'явилася завдяки роботам англійського фізика Осборна Рейнольдса. Він проводив дослідження режимів руху з різними діаметрами труб, швидкостями руху і в'язкістю води (змінюючи її температуру). У своїх роботах Рейнольдс особливу увагу приділяв переходу ламінарного руху в турбулентний. Він встановив критерій динамічної подібності руху в'язкої нестискаємої рідини, який носить його ім'я – число Рейнольдса $Re = V_{cp} D / \nu$, де V_{cp}, D – середня швидкість і діаметр труби, ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості.

Інтерпретація числа Рейнольдса – це відношення сил інерції до сил в'язкості [Л.Д., Ландау, Е.М. Ліфшиц, т.6, 1988, А.С. Монін, А.М. Яглом, 1965]. При русі рідини різні її об'єми рухаються з різними швидкостями, і відбувається обмін енергією між окремими її компонентами. Це особливо яскраво виражено при турбулентному русі. Сили в'язкості, навпаки, намагаються згладити ці пульсації. Отже, при великих числах Рейнольдса рух буде турбулентним, а при малих – ламінарним.

У випадку ідеальної рідини в'язкість її дорівнює нулю. Тоді виходять дуже великі числа Рейнольдса $Re = V_{cp} D / 0 \rightarrow \infty$. Л.Д. Ландау зазначає, що великі числа Рейнольдса еквівалентні дуже малій в'язкості, і така рідина може розглядатися при таких Re як ідеальна. Однак таке припущення явно непридатне для руху поблизу стінок труби. Граничні умови для ідеальної рідини полягають в рівності нулю нормальної складової швидкості. Дотична складова швидкості буде відмінна від нуля. У той же час для реальної в'язкої рідини (води) швидкість на твердих стінках повинна дорівнювати нулю.

Звідси випливає, що зменшення швидкості до нуля на стінці труби при великих числах Рейнольдса буде відбуватися в дуже тонкому

пристіночному шарі рідини – пограничному шарі. Пограничний шар характеризується великим градієнтом швидкості. Цей пограничний шар може бути як ламінарним, так і турбулентним і навіть складатися з декількох шарів.

Дослідження О. Рейнольдс проводив на трубах різних діаметрів. Особливістю був плавний вхід з резервуара в трубу. Критичні значення, що відповідають переходу від ламінарного потоку до турбулентного в цих дослідах складала близько 12830. Наступні досліди показали, що значення можуть бути дуже різними, так як дуже сильно залежать від ступеня збурення ламінарного потоку. Ці збурення можуть бути як внутрішніми в самому потоці, так і зовнішніми (вібрація і ін.). У ламінарному русі завжди є збурення. Однак вони можуть бути настільки рідкісними і не міняти загальну картину ламінарного руху. Хоча швидкість збурень може бути значною. Так для труби з гострими краями, які будуть викликати збурення в потоці, критичне число Рейнольдса становить 2800.

Зменшуючи збурення потоку на вході в трубу можна затягнути перехід від ламінарного руху до турбулентного до значних чисел Рейнольдса. Так за даними Барнеса і Кокера перехід від ламінарного руху до турбулентного був при значеннях $Re_{кр} \approx 20000$, а Екман отримав перехід навіть при $Re_{кр} \approx 50000$.

На лабораторній установці кафедри гідравліки, водопостачання та водовідведення Полт. НТУ ми отримували $Re_{кр} = 9000$ (вхід в трубу не на плавний).

Це показує, що саме число Рейнольдса ще не визначає однозначно перехід від ламінарного руху до руху турбулентного. Тому використовується більш слабкий критерій. Ще Рейнольдсом були поставлені досліди з визначення мінімального значення критерію, при переході від турбулентного руху до ламінарному. Створювалися найбільші збурення потоку на вході в трубу. У дослідах Рейнольдса було отримано мінімальне критичне значення числа $Re_{кр.мін} \approx 2300$.

У більш пізніх дослідах, іншими дослідниками, були отримані значення в межах від 1900 до 2320. Число 2320 отримало назву – нижнє критичне число Рейнольдса. Тобто при $Re < Re_{кр.мін}$ рух завжди залишатиметься ламінарним, які б збурення не виникали і які б інтенсивні не були, вони все одно будуть затухати.

При ламінарному русі рідини в круглоциліндричній трубі розподіл швидкостей визначається рівнянням параболи $u = \frac{\rho g I}{4\mu} (R^2 - y^2)$. Це рівняння справедливе при відстані від входу в трубу $l > 0,065d Re$. Дотичні напруження в перетині труби розподіляються за лінійним законом.

Турбулентний рух. Існує велика кількість моделей турбулентного руху з часів Рейнольдса і Прандтля. Рейнольдс запропонував представляти гідродинамічні параметри турбулентного руху в вигляді суми усереднених і пульсаційних складових, а вивчати тільки усереднені величини. Для

усередненого потоку, який повинен одночасно володіти молекулярною і турбулентною в'язкістю, сумарне дотичне напруження записують у вигляді

$$\tau = \frac{du}{dn}(\mu + \mu_T). \quad (1)$$

Розподіл швидкостей при турбулентному русі визначається логарифмічним законом Прандтля $\frac{u_{\max} - u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln(r/y)$, наближеною ступеневою формулою Альтшуля $u/u_{\max} = (y/r)^{0,9\sqrt{\lambda}}$, формулою Кармана

$$\frac{u_{\max} - u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \left[\ln \left(1 - \sqrt{1 - \frac{y}{r}} \right) + \sqrt{1 - \frac{y}{r}} \right],$$
 і багатьма іншими залежностями.

Як показують розрахунки, значення швидкості досягає величини $u \approx 0,5 \cdot u_{\max}$ на відстані всього лише 1 мм від стінки труби діаметром 500 мм при швидкості $u_{\max} = 1,5$ м / с.

Найбільший градієнт швидкості спостерігається в пограничному шарі. Він істотно впливає на дисипації енергії в потоці. Для зменшення коефіцієнта гідравлічного тертя, і отже, зниження енергетичних витрат на транспортування рідини, застосовуються різні способи.

У промисловості успішно застосовуються полімерні добавки, наприклад, (ПАА, ПЕО і ін.), які дозволяють значно зменшити турбулентність потоку і знизити гідравлічний опір. Це явище відоме як ефект Томса – англійського хіміка, який вперше відкрив в 1948 р це явище. Однак ефект залежить від режиму течії. І може бути знайдений максимум ефекту при певному числі Re.

Вплив на потік акустичних і електромагнітних коливань, що дозволяють знизити поперечні пульсації швидкості в пограничному шарі, що зменшує гідравлічні втрати на тертя. Однак вартість створення таких коливань уздовж трубопроводу може бути набагато більшою від ефекту зниження гідравлічних втрат енергії.

Відомі дослідження, засновані на створенні закрутки потоку для зменшення втрат енергії при транспортуванні рідин. Ці закрутки можуть бути як на початку потоку, так і по всій його довжині трубопроводу або на його частинах. Ефективність закруток потоку буде в певному діапазоні чисел Рейнольдса.

У той же час при значній зміні швидкості течії рідини закрутка може давати негативний або нульовий ефект.

Таким чином, турбулентний потік рідини являє собою досить складне фізичне явище, яке вимагає додаткових досліджень і математичного моделювання на основі рівнянь Рейнольдса та Нав'є - Стокса, а також експериментальних досліджень.