

УДК 532.542

А.М. КРАВЧУК, доктор технічних наук  
Київський національний університет будівництва і архітектури  
О.Я. КРАВЧУК, старший викладач  
Національний транспортний університет

## **АНАЛІЗ КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗБІРНИХ ПЕРФОРОВАНИХ ТРУБОПРОВОДІВ**

*Виконано аналіз експериментальних даних по визначенню кінематичних характеристик збірних перфорованих трубопроводів, які працюють з приєднанням рідини вздовж шляху, приведено рекомендації для їх розрахунку.*

**Ключові слова:** перфорований збірний трубопровід, втрати напору, змінна витрата, коефіцієнт витрати, гідравлічний коефіцієнт тертя, епюр швидкостей, число Рейнольдса.

*Выполнен анализ экспериментальных данных по определению кинематических характеристик сборных перфорированных трубопроводов, которые работают с присоединением жидкости по длине, приведены рекомендации для их расчета.*

**Ключевые слова:** перфорированный сборный трубопровод, потери напора, переменный расход, коэффициент расхода, гидравлический коэффициент трения, эпюр скоростей, число Рейнольдса.

*The analysis of experimental data by the kinematic characteristics determination of collecting perforated pipelines that run with the addition of liquid along its length was accomplished. Calculation recommendations were adduced.*

**Key words:** collecting perforated pipeline, head loss, variable discharge, discharge coefficient, hydraulic coefficient of friction, epure of velocity, Reynolds number.

Аналізу роботи збірних трубопроводів різного призначення в нашій країні і за кордоном присвячено досить велику кількість робіт, в тому числі експериментальних. При цьому основна увага приділялась визначенню середніх інтегральних характеристик, таких як зміна напору (тиску) і витрати вздовж каналу. За останніми розраховувались відповідні значення розшукуваних параметрів.

В спеціальній літературі приводяться окремі експериментальні дані по вимірюванню кінематичних характеристик розглядуваних напірних потоків, аналізуються епюри осереднених швидкостей в поперечному перерізі каналу. Однак, з нашої точки зору, єдиний підхід при їх обробці і узагальненні відсутній, що і викликало необхідність проведення даних досліджень.

Для вимірювання кінематичних характеристик напірних збірних трубопроводів, що працюють зі змінною витратою вздовж шляху, в лабораторії гідравліки Київського національного університету будівництва і архітектури було змонтовано відповідний аеродинамічний експериментальний стенд. Робочою рідиною в дослідах служило повітря. Схема аеродинамічного стенду приведена на рис.1.

В дослідах використовувався сталевий електрозварний трубопровід  $D = 159 \times 4,5$  мм, загальною довжиною  $L = 4,0$  м. При цьому довжина робочої перфорованої частини складала  $l = 3,0$  м. Перфорація в трубі улаштовувалась у вигляді отворів діаметром  $d_0 = 0,003$  м, з кроком  $\Delta l = 0,03$  м, по 8 отворів в кожному поперечному перерізі. В процесі роботи діаметр отворів збільшувався (спочатку  $d_0 = 0,006$  м, потім  $d_0 = 0,009$  м).

В дослідах використовувався сталевий електрозварний трубопровід  $D = 159 \times 4,5$  мм, загальною довжиною  $L = 4,0$  м. При цьому довжина робочої перфорованої частини складала  $l = 3,0$  м. Перфорація в трубі улаштовувалась у вигляді отворів діаметром  $d_0 = 0,003$  м, з кроком  $\Delta l = 0,03$  м, по 8 отворів в кожному поперечному перерізі. В процесі роботи діаметр отворів збільшувався (спочатку  $d_0 = 0,006$  м, потім  $d_0 = 0,009$  м).

Вимірювання профілю осереднених швидкостей і характеру п'єзометричної лінії здійснювались в 10 створах, розташованих через 0,5 і 0,25 м.

Тиск і розрідження в робочому трубопроводі забезпечувались центробіжним вентилятором марки Ц 4-70 № 3,2, який був встановлений на нерухомий монолітний фундамент.

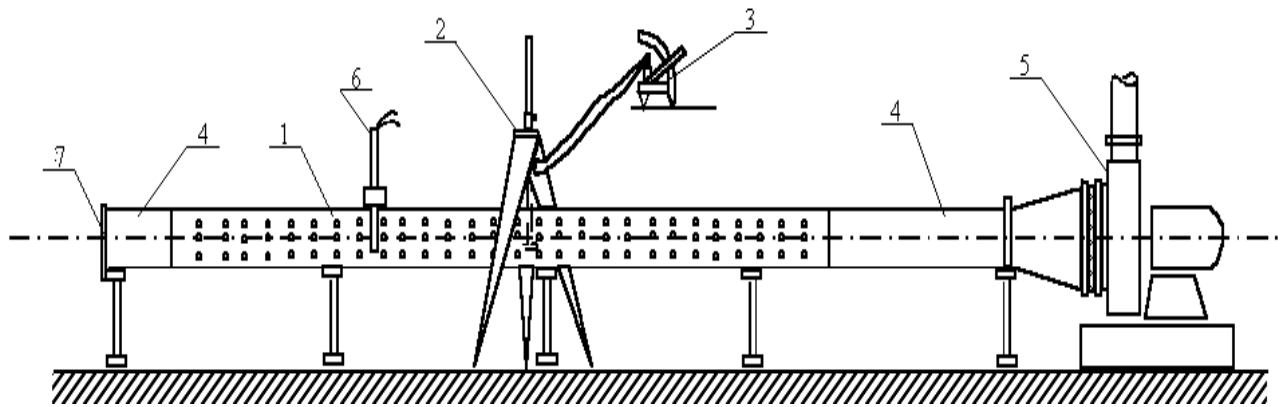


Рис. 1. Схема аеродинамічної експериментальної установки:

- 1 – досліджуваний трубопровід; 2 – координатник з вимірювальною трубкою;  
 3 – мікроманометр; 4 – суцільна ділянка труби; 5 – вентилятор з електродвигуном; 6 – тензометричний датчик; 7 – заглушка

Температура повітря контролювалась ртутним термометром з ціною поділки  $0,2^{\circ}\text{C}$ , барометричний тиск – барометром анероїдом, вологість – психрометром.

Для виміру надлишкового тиску в досліді використовувався мікроманометр ЦАГІ. Динамічний тиск ( $p_{\text{дин}}$ ) в окремих точках потоку в перерізі труби замірявся за допомогою трубки Піто-Прандтля.

Осереднена швидкість в точці заміру визначалась за залежністю

$$\bar{U} = \sqrt{\frac{2p_{\text{дин}}}{\rho}}. \quad (1)$$

Вимірювання в кожному перерізі проводились в двох площинах: в перерізі отворів і в проміжному між ними. Загальна кількість точок виміру для одного перерізу дорівнювала двадцяти. Витрату в перерізі трубопроводу визначали за методом “площа–швидкість”.

Для можливості оцінки і аналізу отриманих результатів, спочатку проводилось вимірювання епюр осереднених швидкостей в трубопроводі без перфорації.

Аналогічні вимірювання виконувались при просвердлених і відкритих отворах для випадку приєднання рідини вздовж шляху. В досліді величина конструктивного параметра  $f = \frac{\alpha_n l}{\Omega}$  змінювалась від  $f_{\text{min}} = 0,3$  до  $f_{\text{max}} = 2,82$ .

В досліді число Рейнольдсу основного потоку змінювалось в межах 10000...150000. При цьому в отворах перфорації воно становило 2000...12000. Тобто, режим руху в усіх випадках був турбулентним.

На рис.2 (а, б) приведені окремі, найбільш характерні і інформаційно ємкісні, епюри осереднених швидкостей при різних конструктивних характеристиках труб.

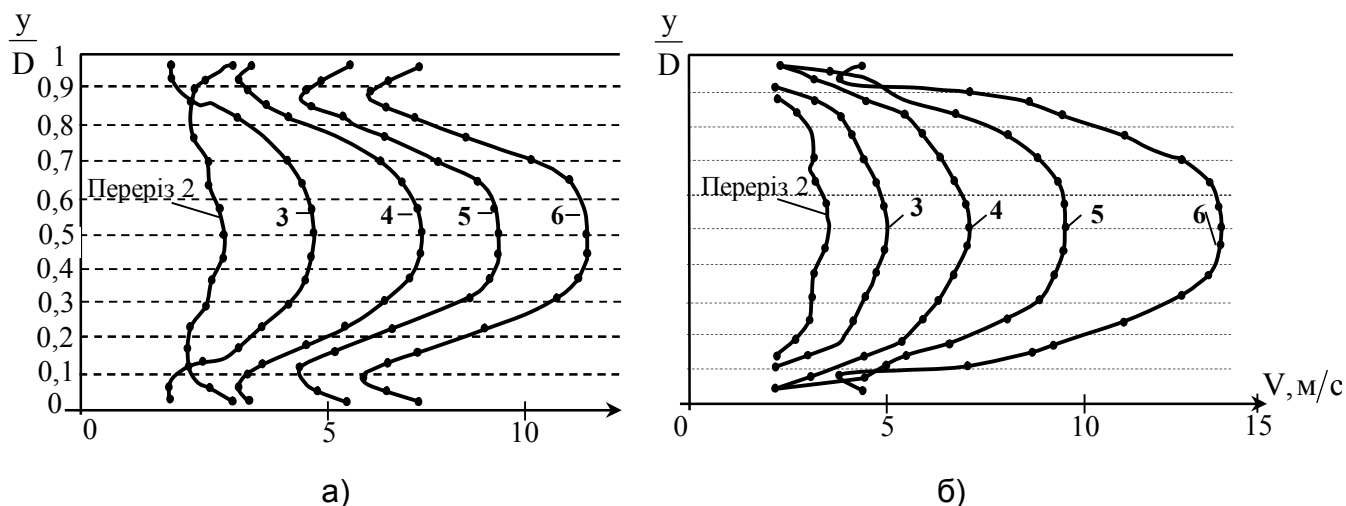


Рис.2. Профілі осереднених швидкостей при русі з приєднанням:  
а)  $f = 1,41$ ; б)  $f = 2,82$

Їх аналіз показує, що вони суттєво відрізняються від епюр осереднених швидкостей при рівномірному русі. Цю обставину можна пояснити інтенсивним впливом приєднаних струминок на основний потік. При симетричному розміщенні отворів перфорації по твірній, епюри будуть симетричні відносно осі трубопроводу, де має місце максимальна за величиною осереднена швидкість в даному перерізі. У випадку несиметричного розміщення отворів, симетричність епюр також порушується.

Приведені епюри свідчать про те, що при рівномірній перфорації бічних стінок каналу, в усіх випадках має місце нерівномірний режим приєднання рідини вздовж шляху. Характер цієї нерівномірності визначається величиною співвідношення між швидкістю руху приєднаних (втікаючих) струминок і середньою в перерізі швидкістю основного потоку в каналі  $\left(\frac{U_0}{V}\right)$ .

Більшому значенню співвідношення  $\frac{U_0}{V}$  відповідає більше викривлення поля осереднених швидкостей у порівнянні з рівномірним рухом. При цьому струминка рідини проникає на більшу глибину в основний потік і інтенсивніше деформує поле осереднених швидкостей в поперечному перерізі збірного каналу.

Для визначення виду залежності, яка описує характер зміни даного співвідношення за довжиною збірного каналу, використаємо результати теоретичного аналізу вихідних рівнянь, які описують рух рідини зі змінною витратою в збірних трубопроводах, приведеного в роботі [1]. У відповідності з останніми, розрахункові залежності для визначення відносної витрати і відносного перепаду напорів вздовж збірного трубопроводу, відповідно, мають вигляд:

$$\bar{Q} = \frac{1}{k} \frac{sh(k\bar{x})}{ch(kf)}, \quad \bar{z} = \frac{ch(k\bar{x})}{ch(kf)}, \quad (2)$$

$$\text{де } \bar{Q} = \frac{Q}{\Omega \sqrt{2gz_k}}, \quad \bar{x} = \frac{\mu_{36} \alpha_n x}{\Omega}, \quad \bar{z} = \sqrt{\frac{z}{z_k}} \quad (3)$$

Коефіцієнт  $k$ , який входить у вказані формули, слід знаходити за графіком на рис.3.

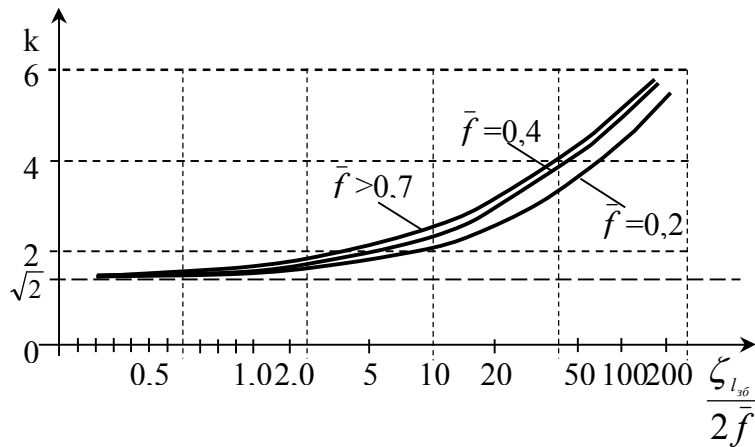


Рис.3. Графік для визначення коефіцієнта  $k$

При цьому, швидкість втікання рідини через отвір (щілину) перфорації з навколишнього простору в трубу складе  $U_0 = \mu_{36} \sqrt{2gz}$ . Тоді, з використанням змінних (3), можна записати

$$\frac{U_0}{V} = \frac{\mu_{36} \sqrt{2gz}}{\bar{Q} \sqrt{2gz_k}} = \frac{\mu_{36} \bar{z}}{\bar{Q}} \quad (4)$$

Підстановка (2) в (4) дозволяє отримати змінне за довжиною збірника значення співвідношення швидкості втікаючих струминок до середньої швидкості потоку в даному перерізі

$$\frac{U_o}{V} = \mu_{36} \frac{\frac{ch(k\bar{x})}{ch(k\bar{f})}}{\frac{1}{k} \frac{sh(k\bar{x})}{ch(k\bar{f})}} = \frac{\mu_{36} k}{th(k\bar{x})} \quad (5)$$

Для середніх у всього розподільника значень визначаємих параметрів, з врахуванням (2), можна записати

$$\frac{U_{0.c}}{V_k} = \frac{\mu_{36.c}}{2} \frac{\bar{z}_n + 1}{\bar{Q}_k} = \frac{k \mu_{36.c}}{2} \frac{ch(k\bar{f}) + 1}{sh(k\bar{f})} \quad (6)$$

На рис.4 представлено графіки, які показують, як змінювались співвідношення  $\frac{U_0}{V}$  і  $\frac{U_{0.c}}{V_k}$  в збірних трубопроводах.

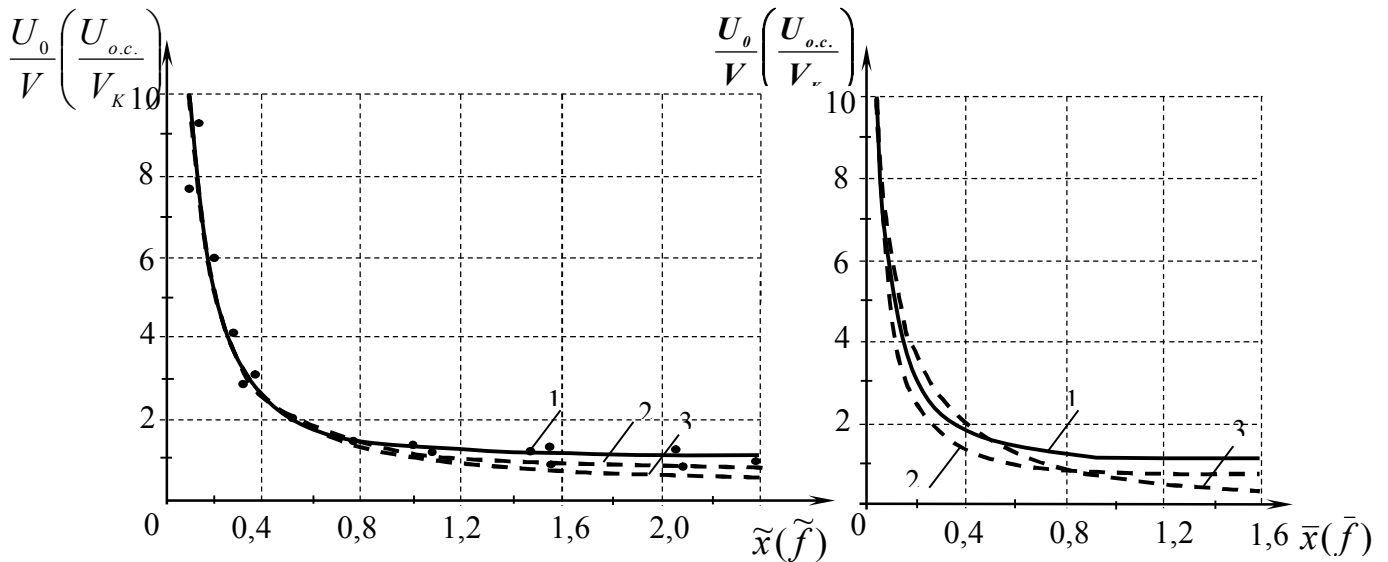


Рис.4. Зміна відношення швидкості приєднаних мас рідини до середньої швидкості в перерізі каналу

Крива 1 (позначення – ●) характеризує зміну даного співвідношення за довжиною трубопроводу ( $\tilde{x} = \frac{\alpha_n x}{\Omega}$ ), при різних значеннях конструктивного параметра  $f = \frac{\alpha_n l}{\Omega}$ , у випадку використання змінних вздовж шляху значень коефіцієнта витрати отворів перфорації  $\mu_{36}$ . Крива 2 відповідає випадку використання в розрахунках значень коефіцієнта витрати постійних для даної конкретної величини параметра  $f$  ( $\mu_{36.c}$ ). Крива 3 відображає зміну відношення середньої швидкості притоку для всього збірника до середньої швидкості в його кінцевому перерізі ( $\frac{U_{0.c.}}{V_k}$ ) при тих же величинах  $f$ .

З наведених графіків видно, що між трьома приведеними кривими існує досить гарне співпадіння. Особливо це має місце в тих межах конструктивних характеристик збірників ( $0,4 < f < 1,0$ ), в яких вони знаходять найширше застосування на практиці. Дана обставина свідчить про те, що при розрахунку конструктивних і гідравлічних характеристик збірних трубопроводів можна користуватися осередненими для даного каналу параметрами і, що це, в межах допустимої похибки, буде відповідати реальній картині руху рідини зі збільшуючоюся витратою вздовж шляху.

На рис.5 представлено зміну відношення  $\frac{Re_0}{Re}$  у збірних трубопроводах при різних діаметрах отворів перфорації.

Отримані графічні залежності показують, що найбільше значення  $\frac{U_0}{V}$  має місце на початкових ділянках збірних труб і поступово зменшується до кінця трубопроводу. Така ж тенденція має місце і відносно викривлення поля

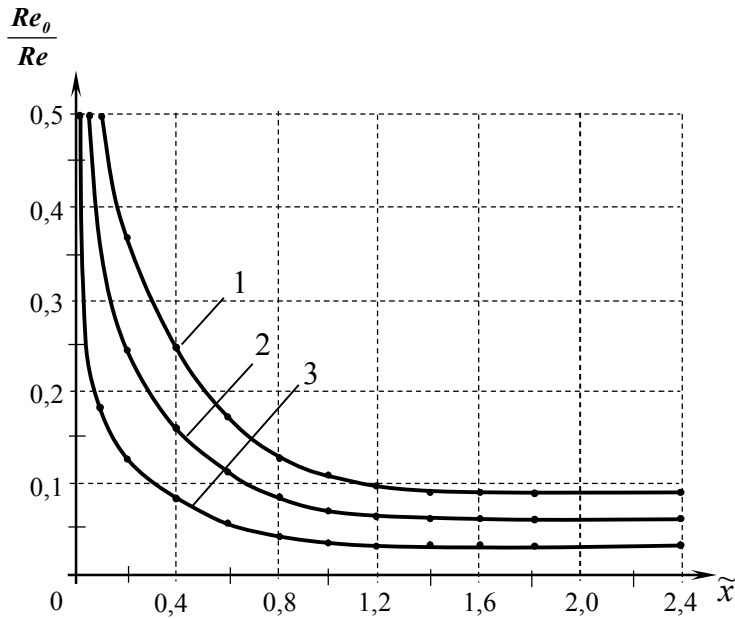


Рис.5. Графіки зміни відношення  $\frac{Re_0}{Re}$  за довжиною збірника:  
 1 –  $d_0 = 0,003$  м;  
 2 –  $d_0 = 0,006$  м;  
 3 –  $d_0 = 0,009$  м

осереднених швидкостей. З рис.4 і рис.5 також можна зробити висновок, що співвідношення  $\frac{U_0}{V}$ ,  $\frac{U_{0,c}}{V_\kappa}$  і  $\frac{Re_0}{Re}$  більші у трубопроводах, які мають менше значення конструктивного параметра  $f$ . При збільшенні  $f$  ці величини будуть зменшуватися. Відповідно, зменшуватиметься глибина проникнення втікаючих струминок рідини в основний потік, тобто меншим стане їх вплив на нього і, як результат, знизиться викривлення епюр осереднених швидкостей у порівнянні з рівномірним рухом.

Приведені дані підтверджують висновок про те, що із зменшенням параметра  $f$ , величина гідравлічного коефіцієнта тертя збірного трубопроводу  $\lambda_{36}$  повинна збільшуватись. І, навпаки, при збільшенні  $f$ , коефіцієнт  $\lambda_{36}$  буде зменшуватися. Повинно існувати граничне значення  $f$ , при перевищенні якого, вплив приєднуваного потоку на основний не буде змінюватись і досягне постійного значення. З рис.4 також слідує, що у відносно короткому збірному трубопроводі, який працює без транзиту (із заглушеним початковим перерізом), відношення  $\frac{U_0}{V}$  стає практично незмінним вже при  $f = 1,7$ . Та ж сама величина граничного значення конструктивного параметра  $f_{гр}$  у відносно коротких збірниках отримана нами в роботах [1,2,3], при теоретичному аналізі основних математичних залежностей, що описують рух рідини в даних трубопроводах.

В першому наближенні вплив втікаючих струминок на основний потік можна представити як умовне збільшення висоти виступів шорсткості стінок каналу. Причому, висота цих виступів буде змінною і залежати від конструктивних параметрів збірного трубопроводу  $\zeta_1$  і  $f$ . При цьому, верхня границя зони виступів приймається не жорсткою, а гнучкою і рухливою.

Втікаючі струминки відтісняють основний потік від стінок трубопроводу, що викликає певне збільшення осереднених швидкостей в ядрі основного транзитного потоку в порівнянні з рівномірним рухом.

Граничну величину відстані  $y_\delta$  від стінки трубопроводу до зони розпаду втікаючих в трубу струминок рекомендується знаходити за графіком на рис.6.

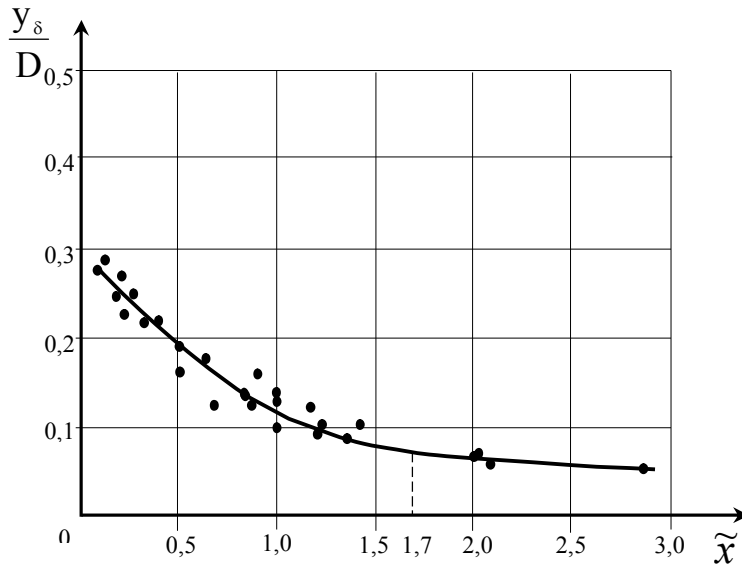


Рис.6. Зміна розмірів пристінної зони  $y_\delta$  від параметру  $\tilde{x}$  за довжиною збірної трубопроводу

З останнього слідує, що величина  $y_\delta$  змінюється за довжиною. При цьому максимальне значення  $y_\delta$  має місце в початкових перерізах труби (при симетричному розташуванні отворів перфорації навіть до величини  $y_\delta = 0,5D$ ). Із збільшенням параметра  $\tilde{x}$  розміри пристінної зони поступово зменшуються і, при значеннях  $\tilde{x} = 1,7$ , стають практично постійними і рівними  $0,07D$ . Ця обставина свідчить про те, що в цьому випадку вплив приєднуваного потоку на основний стає постійним за довжиною. Даний висновок добре підтверджується графіком на рис.4, де при  $\tilde{x} \geq 1,7$  відношення  $\frac{U_0}{V}$  залишається постійним. Таким чином, можна очікувати, що і гідравлічний коефіцієнт тертя на цих ділянках також повинен бути постійним.

Емпірична залежність по визначенню  $y_\delta$  пропонується у вигляді

$$\frac{y_\delta}{r} = 1 - 0,86th(k\bar{x}), \quad (7)$$

де  $r$  – радіус трубопроводу.

Степінь деформованості епюр осереднених швидкостей в перерізах збірних труб оцінювалась величиною коефіцієнтів Коріоліса ( $\alpha$ ) і Бусінеска ( $\alpha_0$ ). Результати дослідів показали, що дані коефіцієнти змінні за довжиною напірного каналу і залежать від конструктивного параметра  $f$ . Меншим значенням  $f$  відповідають більші величини  $\alpha$  і  $\alpha_0$ .



Характеризуючи роботу збірних труб в цілому, а також приймаючи до уваги діапазон зміни конструктивних характеристик реальних систем, для інженерних розрахунків рекомендується приймати  $\alpha \approx 1,3$ ;  $\alpha_0 \approx 1,1$ .

### **Список літератури**

1. *Василенко А.А., Кравчук А.М.* Гидравлический расчет перфорированных сборных трубопроводов произвольной длины. //Гидравлика и гидротехника. – 1986. – Вып. 43. – С. 70 – 73.

2. *Определение* коэффициента гидравлического трения в перфорированных сборных трубопроводах.//Гидравлика и гидротехника. – 1984. – Вып. 38. – С. 32 - 36.

3. *Спеціальні* питання гідравліки систем водопостачання і водовідведення. Навчальний посібник.– К.: ВІПОЛ, 1993. – 136 с.

*Надійшло до редакції 22.05.2016*