

ВТРАТИ НАПОРУ ПІД ЧАС РУХУ ОДНО- ТА ДВОФАЗНИХ СЕРЕДОВИЩ

Представлено опис експериментальної установки для дослідження втрат напору у місцевих опорах. Досліджено втрати тиску по довжині труби та в нестандартних діафрагмах за умов руху води та водоповітряного потоку. Виявлено залежність величини втрат напору від стисливості двофазного потоку.

Вступ

У більшості випадків у дренажних системах спостерігається рух самозакипаючої рідини, тобто двофазного потоку. У літературних джерелах інженерні методики розрахунку таких систем дають розбіжність у визначенні пропускної спроможності більш ніж у двічі [1]. Кожна із наведених методик має свій підхід до визначення пропускної спроможності дренажної системи, але спільним проблемним місцем в усіх методиках є визначення коефіцієнту опору системи. Особливо це стосується систем, в яких відбувається рух двофазного середовища. Оскільки навіть для однофазного потоку визначені за різними літературними джерелами коефіцієнти опору можуть значно відрізнятися.

Мета роботи : дослідження втрат напору по довжині труби та в місцевих опорах під час руху двофазних середовищ.

Опис експериментальної установки. Методика проведення дослідів. Аналіз результатів

Для дослідження втрат тиску по довжині труби та у місцевих опорах при течії одно- та двофазних потоків створено дослідну установку, в якій в якості місцевого опору обрано діафрагму.

Діаметри отворів діаграм d_0 обираються із розрахунку можливості досягнення у їх перерізі швидкості звуку $d_0 = 5$ мм та створення дозвукового потоку $d_0 = 8$ мм під час руху водоповітряної суміші.

Товщина діаграм 2 мм, згідно [2] такі діафрагми є нестандартними. Тому виникає необхідність дослідити її опір під час руху однофазного потоку, щоб встановити коефіцієнт опору $\zeta_{\text{оф}}$.

У схему установки входять: тарувальні баки 2 із рівнемір 12, насоси 1, компресор 4, ротаметри 5, змішувач 6, місцевий опір (діафрагма) 10, запірні пристрої, манометри 3 та 9 (рис. 1).

Усі елементи з'єднані між собою системою трубопроводів. З'єднувальні трубопроводи на випробувальній ділянці виконані із водогазопровідної труби внутрішнім діаметром $d = 15,6$ мм. Для забезпечення стабілізації потоку діафрагма встановлена на відстані $100d$ [3] від найближчого місцевого опору.

Рух потоків у дослідній установці відбувається наступним чином. Вода із баку 2 насосом 1 подається у систему трубопроводів і, подолавши місцевий опір 10, повертається до баку 2'. В процесі досліджень двофазних середовищ до потоку води у змішувачі 6, який являє собою трубу із круглими отворами, підмішується повітря, що подається компресором 4. Після змішування суміш рухається по системі трубопроводів, долаючи місцевий опір 10, і по кінцевому трубопроводу зливається у бак 2'.

Витрата рідини визначається об'ємним методом за перепадом рівня на рівнемірі 12 у баці 2. Витрата повітря визначається за допомогою ротаметрів РМ-04 та РМ-4. Тиск водоповітряної суміші вимірюється за допомогою зразкових манометрів класу точності 0,4 та п'єзометру з ціною поділки 1 мм.

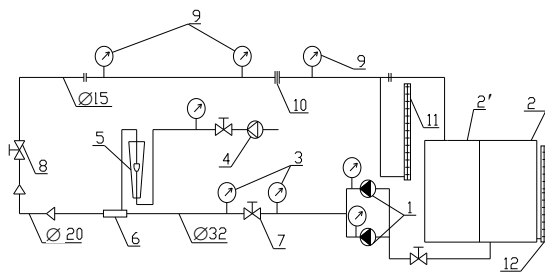


Рис. 1. Схема дослідної установки : 1 – насоси; 2 – мірний бак; 3 – манометри; 4 – компресор; 5 – ротаметри; 6 – змішувач; 7 – вентиль; 8 – шаровий кран; 9 – зразкові манометри; 10 – діафрагма; 11 – п'єзометр; 12 – рівнемір.

темі трубопроводів, долаючи місцевий опір 10, і по кінцевому трубопроводу зливається у бак 2'.

Витрата рідини визначається об'ємним методом за перепадом рівня на рівнемірі 12 у баці 2. Витрата повітря визначається за допомогою ротаметрів РМ-04 та РМ-4. Тиск водоповітряної суміші вимірюється за допомогою зразкових манометрів класу точності 0,4 та п'єзометру з ціною поділки 1 мм.

Під час налагоджувальних та попередніх дослідів проводились: тарування мірних баків 2, перевірка усіх манометрів, експериментальне визначення коефіцієнту гідравлічного опору λ . Досліди проводились за умови усталеності режиму руху рідини або суміші.

Під час проведення дослідів встановлювались необхідні витрати води і повітря та співвідношення між ними, а також вимірювались такі параметри: тиск води на початку випробувальної ділянки, перед діафрагмою, після діафрагми; тиск повітря перед сумішоутворенням; тиск водоповітряної суміші на початку випробувальної ділянки, перед діафрагмою, після діафрагми; витрата води ; витрата повітря ; час проведення дослідів.

Експериментальне визначення коефіцієнту гідравлічного опору виконувалось під час руху води та водоповітряної суміші експериментальною ділянкою, при цьому діафрагма була замінена на шайбу, внутрішній діаметр якої відповідав внутрішньому діаметру досліджуваного трубопроводу ($d = 15,6$ мм). Довжина випробувальної ділянки складала $L = 1,95$ м.

Основні характеристики експериментальних точок під час дослідження втрат тиску на тертя рухові однофазного середовища (води): середній тиск на ділянці $P_{cp} = 95720 \dots 169000$ Па, приведена швидкість руху води

$w_0' = 0,44 \dots 4,32$ м/с, очікувана відносна похибка визначення втрат напору складала $1,1 \dots 12,25$ %, витрати води – $2,32 \dots 10,24$ %.

Отримані коефіцієнти гідравлічного опору (рис. 2) $\lambda_{off} = 0,0376 \dots 0,02405$, що відповідає числам Рейнольдса $Re_1 = 5300 \dots 51600$ і з точністю $\pm 4,8 \dots 8$ % співпадає із розрахованими за формулою Альтшуля у степеневому вигляді для труб із еквівалентною шорсткістю $k_e = 0,0225$ мм.

Як видно із рис.2, експериментальний коефіцієнт λ_{off} в діапазоні числа $Re < 15000$ із точністю до $10 \dots 20$ % відповідає коефіцієнту опору, розрахованому за формулою Блаузіуса для гладких труб, а коли $Re > 15000$ – проявляється вплив шорсткості.

Під час руху вздовж тієї ж експериментальної ділянки двофазного потоку за умов $P_{cp} = 101754 \dots 150646$ Па, $w_0'' = 0,288 \dots 3,2$ м/с, приве-

дена швидкість повітря $w_0'' = 0,056 \dots 6,65$ м/с, очікувана відносна похибка визначення втрат напору складала $2,2 \dots 16,74$ %, витрати води – $2,65 \dots 14,8$ %, витрати повітря – $0,5 \dots 10$ %.

Обробка експериментальних даних, отриманих в процесі дослідження втрат тиску на тертя під час руху водоповітряного потоку, проводилась за залежністю (2-21) [3], де експериментальний коефіцієнт гідравлічного опору визначається як

$$\lambda^E = \Delta P_{дф} / \left[\frac{L}{d} \cdot \rho' \cdot w_0'^2 \cdot \left(1 + x \cdot \psi \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right) \right] \quad (1)$$

де d – діаметр дослідної ділянки, м ; w_0' – швидкість циркуляції, м/с; ρ' , ρ'' - густина відповідно води та повітря, кг/м³, x - витратний масовий газовміст, кг/кг; ψ - коефіцієнт, що визначається за номограмою 5,6 та рис. 2-2[3] $\psi = 1,5$.

Результати обробки за залежністю (1) представлені на рис.3. Коефіцієнт опору тертя у діапазоні $\beta_{cp} = 0 \dots 0,2$ майже не змінюється і відповідає $k_e = 0,08$ мм, а в інтервалі $\beta_{cp} = 0,2 \dots 1$ коефіцієнт λ^E суттєво залежить від витратного об'ємного газовмісту (рис. 3).

Експериментальні дані можна описати залежністю із коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,948$

$$\lambda^E = f(\beta) = 0,0293 + 0,0145 \cdot \beta_{cp} - 0,0075 \cdot \beta_{cp}^2 \quad (2)$$

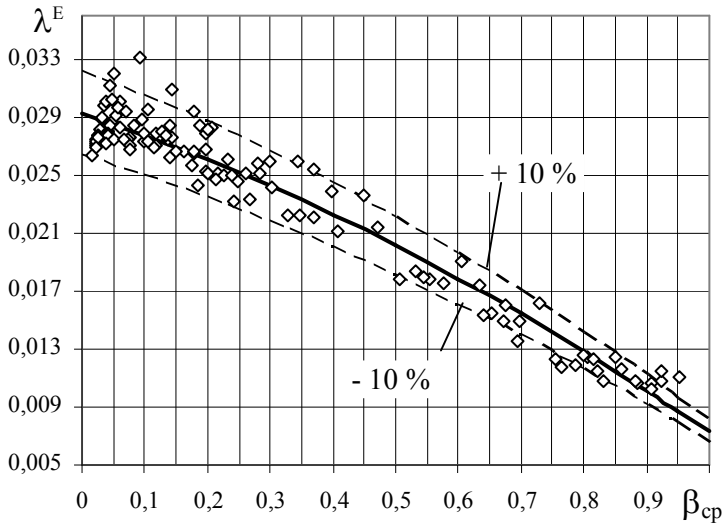


Рис. 3. Залежність коефіцієнту тертя від витратного об'ємного газовмісту β_{cp}

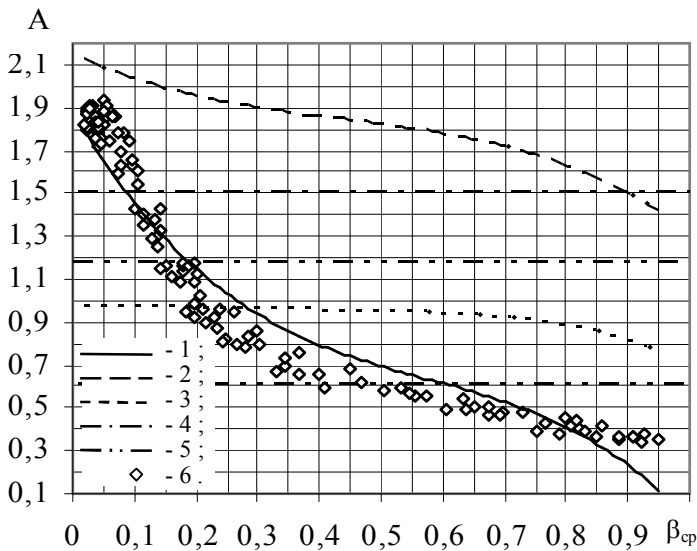


Рис. 4. Залежність коефіцієнту A у формулі (3) від витратного об'ємного газовмісту β_{cp} :

- 1 – розрахунок за моделлю змішаної течії [5]; 2 – за моделлю окремих циліндрів [5]; 3 – за моделлю гомогенної течії [5]; 4 – за [3]; 5 – за [4]; 6 – експериментальні дані.

трів до діафрагми P_3 та за 40 діаметрів після діафрагми P_5 . Заміряні втрати тиску $\Delta P_{зам} = P_3 - P_5$ являють собою суму втрат тиску на тертя по довжині ділянки, втрати тиску на прискорення (при русі двофазного потоку) та втрати тиску безпосередньо у діафрагмі $\Delta P_{мо}$ [3].

Втрати тиску на тертя під час руху однофазного потоку визначались за формулою Дарсі-Вейсбаха [6], а під час руху двофазного потоку за формулою (2.21) [3]. Для розрахунку за вищевказаними формулами коефіцієнт гідравлічного опору визначався згідно із отриманими вище залежностями для втрат тиску на тертя.

Основні характеристики експериментальних точок під час дослідження опору діафрагми із $d_0 = 8$ мм ($d_0 = 5$ мм): $P_{cp} = 97450 \dots 179100$ (95975...194025) Па, $w_0 = 0,66 \dots 3,27$ (0,256...1,84) м/с. Очікувана відносна похибка визначення втрат напору складала 1,03...7,63 (1,08...12,25) %, витрати води – 2,41...10,42 (3,75...9,08) %.

При проведенні експериментальних досліджень втрат напору у діафрагмі під час руху однофазного середовища (води) $(\Delta P_{мо})_{оф}$ встановлено, що із точністю ± 8 % коефіцієнт опору діафрагми діаметром 8 мм $\zeta_{оф8} = 18,2$ (рис.5), в той час як розрахований за (XIII.17) [6] $\zeta = 26,2$ (розходження 31,68 %), розрахований за [3]

Проводилась також обробка цих же експериментальних даних за залежністю (2.25) [4], у вигляді

$$\frac{\Delta P_{дф}}{\Delta P_{оф}} = 1 + A \cdot \frac{w_0''}{w_0}, \quad (3)$$

де A – коефіцієнт (рис. 4).

При $\rho' \gg \rho''$ формула (2.21) [3] перетворюється у (3), де $A = \psi$.

Згідно рис. 4 у діапазоні $\beta_{cp} = 0 \dots 0,8$ з точністю ± 17 % експериментальні дані описуються моделлю змішаної течії [5], але мають розбіжності із величинами, наведеними у [3, 4]. Це можна пояснити тим, що номограма 5б [3] розроблена для пароводяної суміші із тиском більше 10

кгс/см², в той час як наші дослідні дані розташовані у діапазоні $P_{cp} = 1,04 \dots 1,5$ бар. У [4] коефіцієнт $A = 1,18$ у діапазоні $P = 0,0617 \dots 0,131$ МПа визначений апроксимацією експериментальних даних, які отримані при течії водоповітряних потоків у вертикальних трубах із $Re_1 \geq 4650 \dots 15000$ ($d = 12,2 \dots 32,7$ мм), а $A = 0,61$ – отриманий для течій із $Re_1 = 3000 \dots 4000$, в той час як основний масив наших експериментальних даних отриманий в діапазоні $Re_1 = 5011 \dots 38196$.

Після досліджень втрат напору на тертя, проводились дослідження втрат тиску на нестандартній діафрагмі.

Коефіцієнт опору діафрагми на однофазному потоці (вода із температурою 10 °С), рівно як і на двофазному, визначався наступним чином. Для запобігання впливу утворення струмини на покази манометрів безпосередньо перед та після діафрагми, відбори тиску проводились за 90 діаметрів до діафрагми P_3 та за 40 діаметрів після діафрагми P_5 .

$\zeta = 25,2$ (розходження 27,78 %), розрахований за діаграмою 4 – 19 [7] у досліджуваному діапазоні зміни числа Рейнольдса, приведеного до d_0 , $Re' = 10000...80000$ змінюється відповідно у межах $\zeta = 22...24$ (розходження

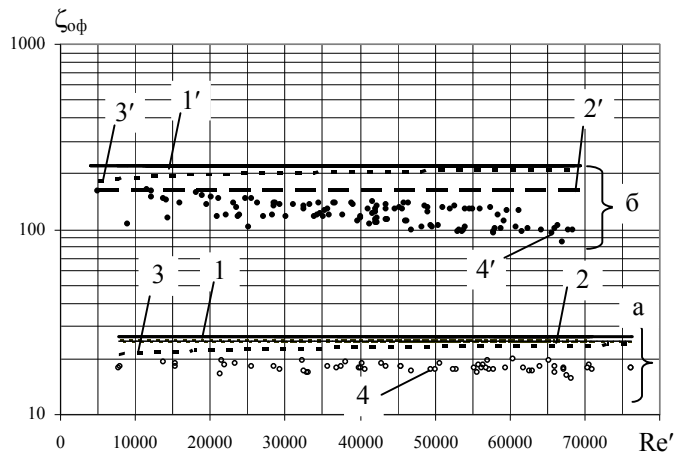


Рис. 5. Порівняння експериментально отриманих коефіцієнтів опору діафрагми із розрахованими за різними методиками для діафрагми з діаметром отвору 8 мм (а) і 5 мм (б): 1, 1' – розраховані за [6]; 2, 2' – за [3]; 3, 3' – за [7]; 4, 4' – експериментальні дані.

ми $d_0 = 8$ мм ($d_0 = 5$ мм) під час руху двофазного потоку проводились за наступних параметрів потоку: $P_{cp} = 102160...152075$ (111400...165950) Па, $w_0' = 0,33...2,53$ (0,24...1,31) м/с, $w_0'' = 0,07...4,02$ (0,05...7,21) м/с. Результати представлені на рис. 6. Очікувана відносна похибка визначення втрат напору складала 0,9...12,17 (0,81...6,35) %, витрати води – 2,6...6,59 (2,73...7,66) % витрати повітря – 0,5...4,17 (0,5...5) %.

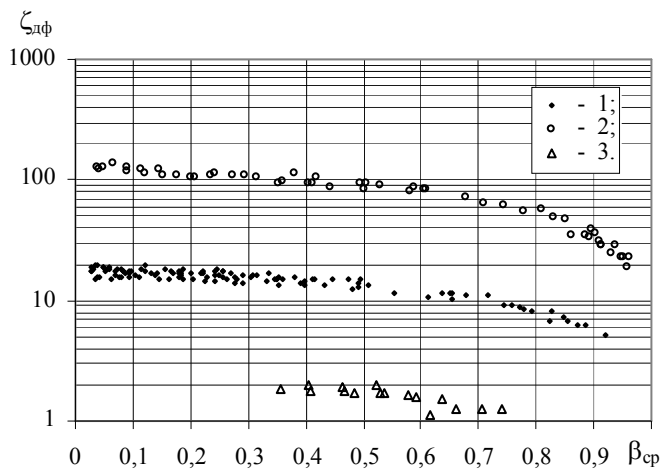


Рис. 6. Залежність коефіцієнтів опору $\zeta_{дф}$ від витратного об'ємного газомісту $\beta_{ср}$: 1 – дослідження опору діафрагми з діаметром отвору $d_0 = 8$ мм; 2 – діафрагми з $d_0 = 5$ мм; 3 – газового вентилі [8].

Якщо представити втрати тиску у місцевих опорах під час руху водоповітряного потоку ($\Delta P_{мо})_{дф}$ у вигляді (3)

$$\frac{(\Delta P_{мо})_{дф}}{(\Delta P_{мо})_{оф}} = 1 + A \cdot \frac{w_0''}{w_0'} \quad (4)$$

17,3...24,2 %). Аналогічно, експериментально із розбіжністю \pm (9...15) % отримані коефіцієнти опору $\zeta_{оф5} = 126$ для діафрагми із $d_0 = 5$ мм. Під час співставлення із розрахунковими значеннями за методикою [6] $\zeta = 221,32$ розбіжність складала 37,6...52,1 %, за методикою [3] $\zeta = 164,88$ розбіжність – 16,3...35,7 %, за діаграмою 4 – 19 [7] – $\zeta = 184,06...212,74$, що відповідають числам $Re' = 8900...70000$ (розбіжність 16,3 ...50,2 %).

Як видно із рис. 5 експериментально отриманий коефіцієнт опору не залежить від числа Рейнольдса Re' на відміну від ζ , розрахованого за діаграмою 4 – 19 [7]. Розбіжність із розрахунковими коефіцієнтами опору можна пояснити нестандартністю конструкції діафрагми.

Дослідження коефіцієнту опору діафрагми під час руху одно- та двофазного середовища (рис. 5, рис. 6) можна помітити, що у діапазоні зміни витратного об'ємного газомісту $\beta_{ср} = 0...0,2$ із точністю до 5 % $\zeta_{дф} = \zeta_{оф}$; у діапазоні $\beta_{ср} = 0,2...1$ коефіцієнт опору двофазного середовища суттєво залежить від об'ємного газомісту, як і у [8]. Для $\beta_{ср} > 0,8$ число Маха (M) наближається до одиниці, тобто швидкість суміші у отворі діафрагми наближається до швидкості звуку у суміші. Із літератури [9] відомо, що при значеннях числа $M > 0,75 \div 0,85$ коефіцієнт гідравлічного опору із ростом числа M зменшується і наближається до нуля, коли $M \rightarrow 1$. Аналізуючи вищезазначене, можна зробити аналогічні висновки стосовно коефіцієнту опору діафрагми.

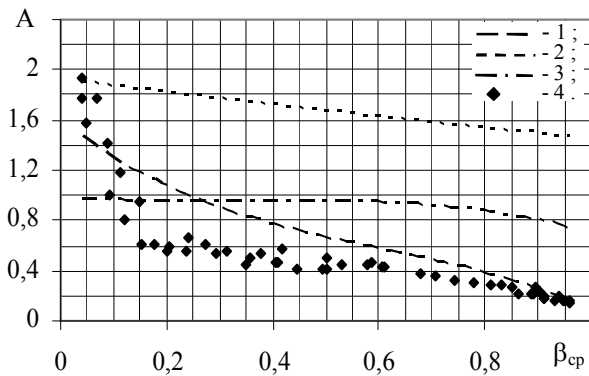


Рис. 7. Залежність коефіцієнту А для випадку дослідження втрат тиску у місцевих опорах від витратного об'ємного газозмісту β_{cp} :
 1 – розрахунок за моделлю змішаної течії [9] ;
 2 – за моделлю окремих циліндрів [9] ;
 3 – за моделлю гомогенної течії [9] ;
 4 – експериментальні дані ($d_0 = 5$ мм).

При порівнянні коефіцієнтів опору, отриманих на нестандартних діафрагмах із розрахунковими для стандартних діафрагм аналогічного діаметру отвору виявлено суттєву розбіжність. Також виявлено відсутність впливу швидкості потоку на коефіцієнт опору тертю. Виявлено аналогію залежності коефіцієнта А в формулах (3) для втрат тиску на тертя та (4) – в місцевих опорах від витратного об'ємного газозмісту. Це дає можливість зробити висновок, що втрати тиску в діафрагмі з достатньою точністю можна описати, користуючись моделлю змішаної течії, яка застосовувалась для визначення втрат на тертя по довжині труби.

то спостерігатимемо тенденцію дещо подібну до представленої для втрат тиску на тертя (рис. 4), але експериментально отриманий коефіцієнт А (рис. 7) наближається до розрахованого за моделлю змішаної течії лише у діапазоні $\beta_{cp} = 0,6 \dots 0,95$ із точністю 8...25 %.

Висновки

В результаті проведення експериментальних досліджень втрат тиску на тертя визначені коефіцієнти опору тертя на дослідній ділянці під час течії одно- та двофазного потоку і проведено порівняння їх із розрахунковими значеннями інших авторів. Досліджено, проаналізовано і співставлено із відомими розрахунковими моделями залежність коефіцієнту А у формулі (3) від витратного об'ємного газозмісту. Виявлено, що отримані експериментальні дані можна описати користуючись моделлю змішаної течії потоку.

Література

1. Ткаченко С.Й., Степанова Н.Д. Методи розрахунку конденсаторопроводів // Вісник Хмельницького національного університету. – 2005. – № 6, Том 2. Технічні науки. – С. 82–85.
2. ГОСТ 8.563.1-97. ГИСОЕИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления. Диафрагмы, сопла Иса 1932 и трубы Вертури, установленные в заполненных трубопроводах круглого сечения. Технические условия. – Взамен ГОСТ 23720-79, ГОСТ 26969-86, РД 50-213-80, МИ 2204-92, МИ 2346-95; Введ. 01.09.2001. – Киев : Госстандарт Украины, 2001. – 61 с.
3. Гидравлический расчет котельных агрегатов : (Нормативный метод)/Балдина О.М., Локшин В.А., Петерсен Д.Ф. и др.; Под ред. В.А. Локшина и др. – М.: Энергия., 1978. – 256 с.
4. Федоткин И.М., Ткаченко С.И. Теплогидродинамические процессы в выпарных аппаратах. – К.: Техніка, 1975. – 212 с.
5. Теплопередача в двухфазном потоке / Под ред. Д. Баттерворса и Г. Хьюитта: Пер. с англ. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
6. Альтшуль А.Д., Киселев П.Г. Гидравлика и аэродинамика. Учеб. пособие для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М. : Стройиздат, 1975. – 323 с.
7. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиздат, 1975. – 464 с.
8. Ткаченко С.Й., Степанова Н.Д., Степанов Д.В. Втрати тиску в місцевих опорах при течії двофазних потоків//Вісник ВПІ.–2000. –№ 1.– С. 43–46.
9. Фисенко В.В., Сычиков В.И. О влиянии сжимаемости на гидродинамику двухфазных потоков// ИФЖ, Том XXXII, 1977. - №6. – С. 1059–1061.