

Орел В.І., к.т.н. (Національний університет "Львівська політехніка", м.Львів)

## ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЦІ ТРАНЗИТНОГО СТРУМЕНЯ РІДИНИ ПРИ РАПТОВОМУ РОЗШИРЕННІ ПОТОКУ

Проаналізовано наявні формули, які описують транзитний струмінь рідини при раптовому розширенні потоку по розділювальній лінії течі. Запропоновано для використання нову степеневу формулу з показником степеня 4,37.

The available formulas which describe a transit stream of fluid at sudden expansion of a flow for the free streamline are analysed. The new power formula with parameter of a degree 4,37 for use is offered.

Відрив турбулентного потоку погіршує робочі характеристики багатьох машин і технічних пристроїв [1]. У раптовому розширенні поперечного перерізу трубопроводу, як дифузори з кутом конусності  $180^\circ$ , найбільш повно виявляються особливості відривних течій [2]. При цьому за точкою відриву потоку утворюються замкнені області руху зі зворотними течіями рідини (рис. 1).

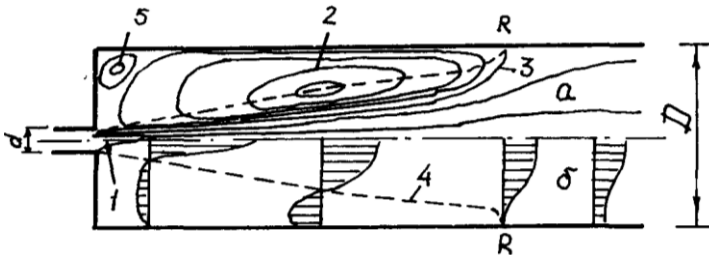


Рис. 1. Картина течії в трубі з раптовим розширенням потоку:

а – лінії течії; б – профілі швидкості;

1 – ядро потоку; 2 – область циркуляційної течії; 3 – розділювальна лінія течії; 4 – лінія нульових швидкостей; 5 – вторинний вир [3, с.8]

На ділянці розширення потоку лінія нульових швидкостей (ЛНШ) поділяє потік на область прямої течії, що включає струмінь по розділювальній лінії течії (РЛТ), і зворотну область циркуляційної течії. РЛТ відділяє транзитну частину струменя зі сталою витратою від області рециркуляції. На межі контакту останніх виникають дотичні турбулентні напруження і відбувається перерозподіл енергії потоку, а саме її дисипація [7–9]. Проте, РЛТ насправді є

тонким зсувним шаром, який часто успішно моделюють розривом швидкості в нев'язкому потоці [10].

Слід зауважити, що при малих значеннях ступеня розкриття дифузору  $D/d$  (згідно з [4],  $D/d < 1,72$ ) розвиток циркуляційної течії відбувається в межах початкової ділянки струменя, яка містить ядро потоку [3, с.9]. За своїми властивостями ця течія мало відрізняється від обтікання оберненого плоского уступу дозвуковим потоком [5]. При  $D/d < 1,87$  довжина початкової ділянки є приблизно рівною довжині області циркуляційної течії  $X_R$  [3, с.92]. Крім того, довжина ділянки повторного приєднання струменя  $X_R$  практично не залежить від числа Рейнольдса  $Re_d$  в діапазоні його зміни  $(1 \dots 1000) \cdot 10^3$  [6, с.13].

**Метою роботи** є аналітичне визначення границі транзитного струменя рідини при раптовому розширенні потоку. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати експериментальні дані для струменя по РЛТ, наведені в літературі.

**Досягнення поставленої мети** і вирішення завдань досягатимуться порівнянням експериментальних даних з наявними формулами, які описують профіль струменя по РЛТ, та їх рекомендацією щодо використання.

**Профіль струменя по ЛНШ** у першому наближенні описували залежністю [11]:

$$D(x) = d + (D - d) \cdot \bar{x} \quad (1)$$

де  $\bar{x}$  – відносна довжина,

$$\bar{x} = \frac{x}{X_R} \quad (2)$$

$x$  – поточна координата.

Представимо залежність (1) у вигляді:

$$D(x) = d + 2 \cdot h \cdot z(x) \quad (3)$$

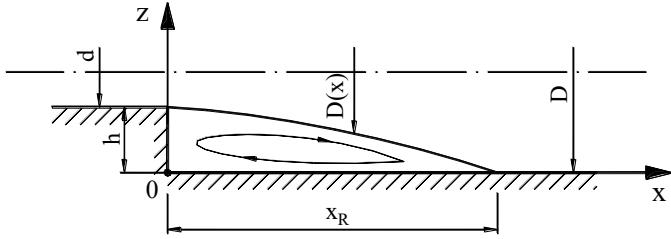
де  $h$  – висота уступу (рис.2),

$$h = 0,5 \cdot (D - d) \quad (4)$$

$z(x)$  – функція поточної координати  $x$ .

Будемо описувати профіль струменя по РЛТ (рис.2) залежністю (3).

**Рис. 2.** Профіль струменя по РЛТ при раптовому розширенні потоку



Так, за [9] при односторонньому плановому розширенні, коли РЛТ знаходилась дуже близько від лінії нульових поздовжніх швидкостей,

$$z(x) = 1 - \sqrt{1 - \bar{x}} \quad (5)$$

При обтіканні уступу [12, 13]

$$z(x) = 1 - \left[ \exp(\bar{x}) \cdot (\bar{x} - 1) \right]^2 \quad (6)$$

При відриві за оберненим уступом, що описується апроксимаційною залежністю [14]:

$$z(x) = \left( \frac{\bar{x}}{x} \right)^{1,5} \quad (7)$$

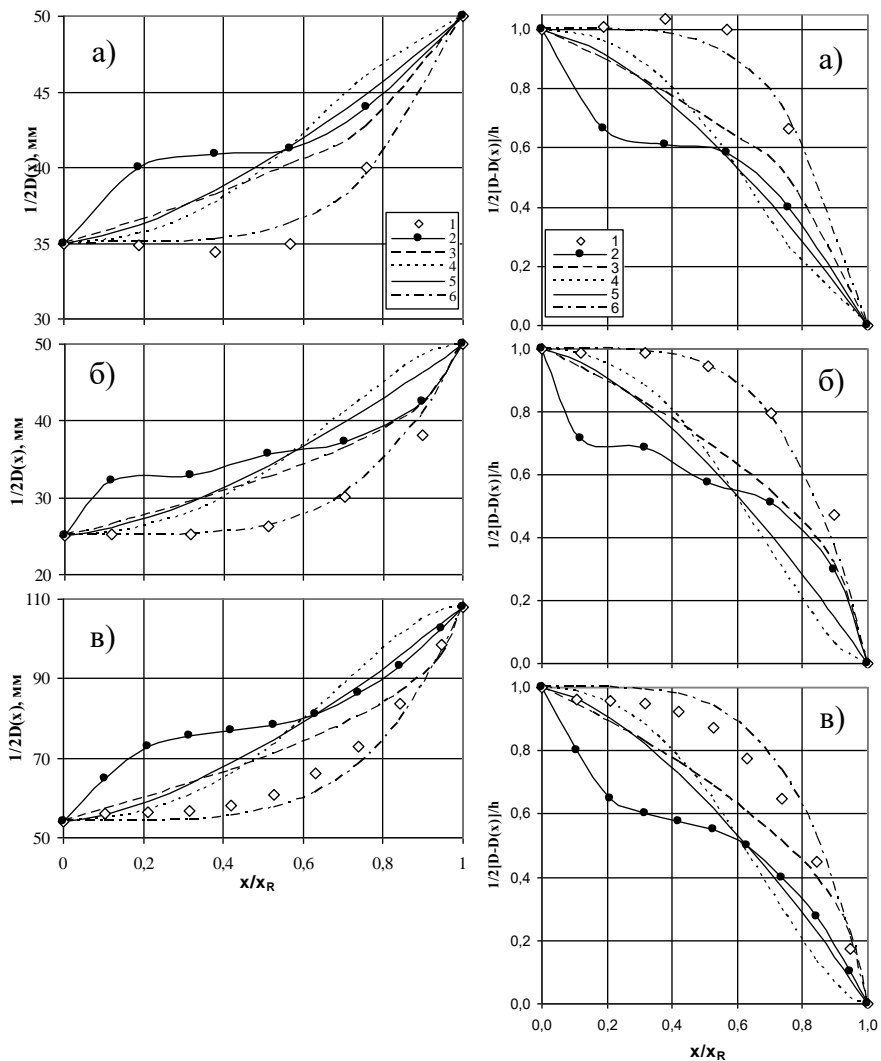
**Розглянуто раптові розширення труб**, умови течії в яких наведено в таблиці 1. При цьому обмежилися значеннями  $D/d \leq 2,0$ , оскільки тенденція до несиметричного повторного приєднання струменя зростає при збільшенні  $D/d$  від 1,223 до 2,323 [15]. Крім того, течію повітря можна розглядати, як течію нестисливої рідини при числах Рейнольдса  $Re_d \geq 22 \cdot 10^3$  та Маха  $M \leq 0,1$  [16].

Таблиця 1

**Розглянуті раптові розширення труб**

Ч/ч	Діаметр труб, мм		Ступінь розкриття дифузору $D/d$	Число Рейнольдса $Re_D$	Відносна довжина області циркуляції $x_R/D$	Середовище	Джерело
	d	D					
1.	70	100	1,429	$196 \cdot 10^3$	1,320	повітря	[17]
2.	50	100	2,000	$30 \cdot 10^3$	2,050	повітря	[2]
3.	108	216	2,000	$100 \cdot 10^3$	2,375	повітря	[18]

Будувалися залежності в координатах  $\bar{x} - 1/2 \cdot D(x)$   
 $\bar{x} - 1/2 \cdot [D - D(x)]/h$ , показані на рис. 3.



**Рис. 3.** Профілі струменя рідини при  $D/d=1,429$  [17] (а);  $2,0$  [2] (б) і [18] (в)  
 за експериментальними даними по РЛТ – 1 та ЛНШ – 2  
 та за формулами (3) і (5) – 3; (3) і (6) – 4; (3) і (7) при  $n=1,5 - 5$  і  $n=4,37 - 6$

Аналіз рис. 3 показав, що відносно експериментальних точок по РЛТ всі лінії за залежністю (3) та формулами (5)–(7) розміщені з відхиленням. Для пояснення цих відхилень з'ясуємо можливі похибки експериментів. На значення похибки впливають: відхилення внутрішнього діаметра  $D$  по довжині труби від середнього його значення; точність побудови епюр швидкостей в перерізах, які розглядаються; значення витрати рідини. Неточності визначення внутрішнього діаметра трубопроводу та витрати мають систематичний характер. При цьому розвинений рух буде турбулентним при числі Рейнольдса  $Re_D > 4 \cdot 10^3$  [5, с.156]. Похибка вимірювання полів швидкостей залежить від того, чи використовувалися вимірювальні пристрої, що є чутливими до напрямку руху потоку [3, с.21]. Зараз відомо декілька вимірювачів швидкості, що можна застосовувати для течій в раптовому розширенні потоку, серед яких, зокрема, лазерний доплерівський анемометр (ЛДА) [3, с.21; 19]. Для даних, наведених у таблиці 1, тільки у п.1 [17] був використаний ЛДА.

Жодна з формул (5)–(7) при використанні їх у залежності (3) не дає задовільних результатів. Так, формула (6) описує профіль струменя по РЛТ при довжині  $x/x_R = 0 \dots 0,15$ , а формула (5) – при  $x/x_R = 0,9 \dots 1,0$ .

Найкраще експериментальні дані в усьому діапазоні зміни  $\bar{x} = 0 \dots 1,0$  для кожного конкретного значення  $D/d$  (див. таблицю 1) описує формула (7), але з іншим показником степеня  $n = 4,37 > 1,5$ . Це майже відповідає кривій Віташинського, якою окреслюють профіль сопла з рівномірним профілем швидкостей на вході [20, с.189]:

$$D(x) = \frac{d}{\sqrt{1 - \left[ 1 - \frac{1}{\left(\frac{D}{d}\right)^2} \right] \cdot \frac{[1 - (1 - \bar{x})^2]^2}{[1 + 3 \cdot (1 - \bar{x})^2]^3}}} \quad (8)$$

Для одержання залежності  $n = f(D/d)$  для експериментальних результатів з радіальними профілями осьової складової швидкості необхідно знайти значення функції течії, інтегруючи рівняння нерозривності. Далі, з'єднавши точки з однаковими значеннями радіальних профілів функції течії при їхній побудові в декількох поперечних перерізах, можна одержати лінії течії [21]. Потім аналізувати профіль струменя по РЛТ.

**При раптовому розширенні потоку** у трубопроводі профілю струменя по РЛТ для всього діапазону зміни  $\bar{x} = 0 \dots 1,0$  та різних значень  $D/d$

найкраще відповідає формула (7) з показником ступеня  $n = 4,37$ , а для кожного конкретного значення  $D/d$  – формули (3) та (9), використані разом.

1. Симпсон. Обзор некоторых явлений, возникающих при отрыве турбулентного потока // Теор. основы инж. расчетов: Тр. Америк. об-ва инж.-мех. – 1981. – Т.103, № 4. – С.131-149. 2. Будун Н.Ф., Шахин В.М. Закрученное течение в круглой трубе переменного сечения при наличии отрыва // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1971. – № 13, вып.3. – С.6-13. 3. Турбулентные струйные течения в каналах / В.Е. Алемасов, Г.А. Глебов, А.П. Козлов, А.Н. Щёлков. – Казань: Казанский филиал АН СССР, 1988. – 172 с. 4. Кталхерман М.Г. Исследование турбулентных отрывных течений в канале, структура потока и теплопередача: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: ИТПМ СО АН СССР. – Новосибирск, 1970. 5. Турбулентность / П. Брэдшоу, Т. Себеси, Г.-Г. Фернгольц и др.; Под ред. П. Брэдшоу. – М.: Машиностроение, 1980. – 343 с. 6. Назарчук М.М., Панченко В.Н. Ограниченные струи. – Киев: Наук. думка, 1981. – 212 с. 7. Шеренков И.А. Устойчивость спокойного потока при расширении его в нижнем бьефе с образованием водоворотных зон // Гидравлика и гидротехника: Республ. межвед. науч.-техн. сб. – 1968. – Вып.6. – С.14-18. 8. Гусак А.И. Некоторые вопросы движения ограниченной струи капельной жидкости // Гидравлика и гидротехника: Межвед. республ. науч.-техн. сб. – 1966. – Вып.3. – С.37-43. 9. Горелов Г.М., Трянов А.Е. Течение при внезапном расширении канала // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1970. – № 3. – С.54-62. 10. Тузон. Устойчивость искривлённой разделяющей линии тока // Теор. основы инж. расчётов: Тр. Америк. об-ва инж.-мех. – 1977. – Т.99, № 3. – С.267-268. 11. Орел В.И. Розрахунок геометричних параметрів обмежених струменів рідини // Вісн. Нац. ун-ту "Львів. політехн.". Теплоенергетика. Інженерія довілля. Автоматизація. – 2004. – № 506. – С.133-139. 12. Синицына И.Е. Исследование обтекания воздушным потоком поверхности с широким спектром шероховатости: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.05 / ИМСС УО АН СССР. – Пермь, 1990. – 24 с. 13. Синицына И.Е. Влияние макрошероховатости и рельефа местности на структуру приземного турбулентного слоя // Гидрогазодинамика течений с тепломассообменом: Межвед. сб. науч. тр. – 1989. – Вып.3. – С.38-45. 14. Кузьменко В.Г. Численное моделирование турбулентного течения с отрывом за обратным уступом // Прикладна гідромеханіка. – 2007. – Т.9 (81). – № 4. – С.37-48. 15. Горелов Г.М., Фрейдин А.С. Некоторые результаты экспериментального исследования диффузора с подпором потока на входе // Докл. кустовой науч.-техн. конф. по вопросам мех. жидк. и газа: Тр. КуАИ. – 1963. – Вып. XV, ч.2. – С.145-150. 16. Земаник, Дугалл. Местный теплообмен за участком резкого расширения круглого канала // Теплопередача: Тр. Америк. об-ва инж.-мех. – 1970. – Т.99, № 1. – С.54-62. 17. Мун, Рудингер. Распределение скорости в канале круглого сечения с внезапным расширением // Теор. основы инж. расчетов: Тр. Америк. об-ва инж.-мех. – 1977. – Т.99, № 1. – С.326-332; Обсуждение. – 1977. – Т.99, № 3. – С.269-272. 18. Chaturvedi M.C. Flow characteristics of axisymmetric expansions // J. Hydraul. Div.: Proc. ASCE. – 1963. – Vol.89, № 3, pt.1. – P.63-92. 19. Итон Дж.К., Джонстон Дж.П. Обзор исследований дозвуковых турбулентных присоединяющихся течений // Ракетная техника и космонавтика. – 1981. – Т.19, № 10. – С.7-19. 20. Гальперин Л.Г. Основы гидрогазодинамики: Курс лекций. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007. – 238 с. 21. Оуэн. Экспериментальное исследование

характеристик турбулентной струи с возвратным течением // Ракетная техника и космонавтика. – 1976. – Т.14, № 11. – С.64-72.