

РОЗРАХУНОК ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБМЕЖЕНИХ СТРУМЕНІВ РІДИНИ

© В.І. Орел, 2004

In paper the computation of geometrical parameters of the restricted jets of a liquid at sudden expansions of pipes are presented.

Постановка проблеми

Вивчення структури течії рідин і газів у замкненому просторі є важливим етапом на шляху створення технологічних об'єктів, які в своїх конструкціях містять внутрішні потоки [1]. При цьому відрив турбулентного потоку продовжує створювати проблеми гідродинамікам, оскільки може погіршувати робочі характеристики багатьох машин і технічних пристроїв [2].

Відрив потоку, мабуть, відноситься до найбільш важливих гідродинамічних проблем, його необхідною умовою є додатній градієнт тиску [3, с.13], що характерний для дифузорних течій.

Розглянемо раптове розширення поперечного перерізу трубопроводу як дифузор з кутом конусності 180° , оскільки в ньому найбільш повно виявляються особливості відривних течій [4]. При цьому за точкою відриву утворюються замкнені зони руху зі зворотними течіями рідини (рис.1).

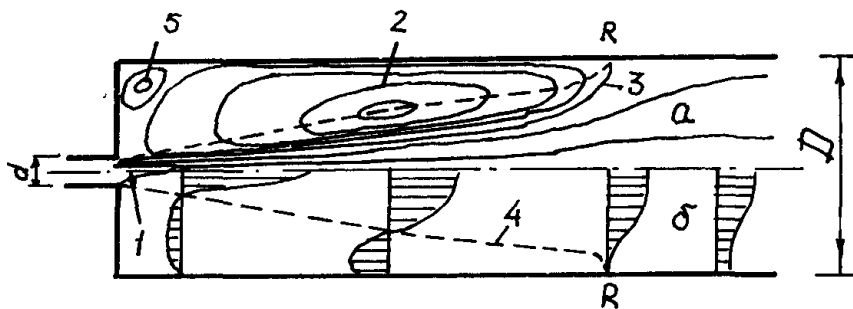


Рис.1. Картина течії в трубі з раптовим розширенням потоку: а – лінії течії; б – профілі швидкості; 1 – ядро потоку; 2 – область рециркуляційної течії; 3 – розділювальна лінія течії; 4 – лінія нульових швидкостей; 5 – вторинний вихор [5]

Варто зауважити, що при малих значеннях ступеня розкриття дифузора D/d (згідно з [6], $D/d < 1,72$) розвиток циркуляційної течії відбувається в межах початкової ділянки струменя, яка містить ядро потоку [5]. А при $D/d < 1,87$ довжина початкової ділянки приблизно рівна довжині зони оберненої течії [5, с.92].

Струмінь, який втікає в канал, на відміну від вільного затопленого струменя, взаємодіє з турбулізованим середовищем [5, с.40], тобто зі збуреним навколишнім середовищем, яке має високий власний рівень турбулентних пульсацій швидкості [5, с.19].

Початкова ділянка турбулентного струменя в каналі з великим ступенем раптового розширення, як показують експерименти, практично не відрізняється від початкової ділянки вільного затопленого струменя [5, с.88].

Задачі досліджень

Метою роботи є визначення геометричних параметрів обмежених струменів рідини при раптовому розширенні труби. Для досягнення поставленої мети необхідно проаналізувати наявні формули для розрахунку таких геометричних параметрів, як діаметр обмеженого струменя та довжина області рециркуляції, порівняти їх з експериментальними даними та дати рекомендації по щодо використання.

Порівняння експериментальних даних і формул для розрахунку діаметра обмеженого струменя та довжина області рециркуляції

Параметри обмежених струменів може бути визначено на основі вимірювання полів швидкостей [1].

Для порівняння геометричних параметрів вільних затоплених і обмежених струменів рідини для розрахунку беремо профіль по лінії нульових швидкостей, яка поділяє потік на область прямої течії, що включає транзитний струмінь і пряму гілку вихорової зони, та область протилежної течії, що включає зворотну гілку вихорової зони.

Наведемо формули, що дають змогу прослідкувати зміну діаметра струменя рідини.

Профіль вільного затопленого струменя на початковій ділянці при $x=(4,0\dots4,5)\cdot d$ (рис.2,а) визначається за формулою [7]:

$$D(x) = d + 2x \cdot \operatorname{tg} \alpha_{\Pi} , \quad (1)$$

де x – позовжня координата;

α_{Π} – кут одностороннього розширення зовнішньої границі струменя,
 $\alpha_{\Pi} \approx 8^{\circ}20'$, $\operatorname{tg} \alpha_{\Pi} = 0,144$.

Профіль обмеженого струменя рідини в раптовому розширенні труби (рис.2,б) обчислюється як [8]:

$$D(x) = d + (D - d) \cdot \left(\frac{x}{x_R} \right)^k , \quad (2)$$

де x_R – довжина області рециркуляції (ділянки повторного приєднання потоку);

k – показник степеня,

$$k = 0,6 \cdot n ,$$

яка дійсна при ступені розширення потоку $n=(D/d)^2=1,56\dots11,1$ (що відповідає $D/d=1,25\dots3,33$).

Границя транзитного струменя, тобто струменя по розділювальній лінії течії, при односторонньому плановому розширенні, що знаходилась дуже близько від лінії нульових позовжніх швидкостей [9]:

$$D(x) = D - (D - d) \cdot \left(1 - \frac{x}{x_R} \right)^{1/2} \quad (3)$$

По аналогії з формулою (1) профіль струменя рідини для двостороннього планового розширення, наприклад [10], що з'єднає точки відриву та повторного приєднання потоку (рис.2,в):

$$D(x) = d + 2x \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (4)$$

де $\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{x_R}$;

h – висота уступу,

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

Формулу (4) можна представити в такому вигляді:

$$D(x) = d + (D - d) \cdot \left(\frac{x}{x_R} \right). \quad (4a)$$

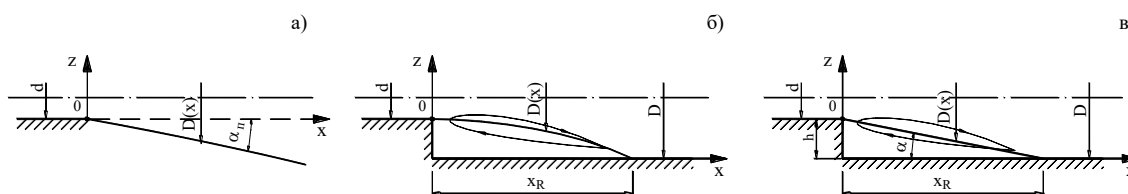


Рис.2. До пояснення формул (1) – а, (2) – б та (4) – в

У дослідженні використано раптові розширення труб, умови течії та методи вимірювання в яких наведено в таблиці.

Використані раптові розширення труб

Ч/ч	Діаметр труб, мм		Ступінь розкриття дифузора D/d	Джерело	Число Рейнольдса Re_d або швидкість V_d , м/с	Середовище	Метод вимірювання
	d	D					
1.	70,0	100,0	1,429	[11]	$2,8 \cdot 10^5$	повітря	ЛДА, метод водяних крапель
2.	43,2	63,5	1,470	[12]	—	повітря	—
3.	120,0	188,0	1,567	[13]	26...90 м/с	нестискуваний газ	швидкісна трубка
4.	50,0	80,0	1,600	[14]	$(1...6) \cdot 10^4$	дизельна олива	ЛДА
5.	50,8	95,2	1,874	[15]	$3,59 \cdot 10^4$ **)	повітря	ЛДА
6.	50,8	96,0	1,890	[16]	$8,6 \cdot 10^4$	кімнатне повітря	ЛДА
7.	50,0	100,0	2,000	[4]	$6 \cdot 10^4$	повітря	двотрубчаста насадка
8.	108,0	216,0	2,000	[17]	$2 \cdot 10^5$	повітря	трубка статичного тиску, трубка Піто
9.	110,0	220,0	2,000	[18, дані Park'a]	—	—	—
10.	—	—	2,100	[19]	$3 \cdot 10^4$	—	ЛДА
11.	—	—	3,820	[5]	50...100 м/с	повітря	двоканальний і фазоінвертуючий термоанемометри
12.	62,0*)	340,0	5,484	[20]	50 м/с	повітря	трубка повного напору

*) внутрішній діаметр кола, вписаного в 16-гранну трубу

**) за висотою уступу

Як видно з графіків (рис.3), експериментальні точки окреслюють профіль струменя дзвіноподібної форми. Обмежений струмінь на ділянці приседнання витрати, центр якої знаходиться на відстані $0,1x_R$ від початку розширення [21], поводить себе як вільний, а його профіль описується формулою (1), що підтверджує сказане вище [5, с.88]. Проте, далі, порівняно з вільним струменем, при вході турбулентного струменя в канал з раптовим розширенням спостерігається більш інтенсивне розширення останнього [5, с.92-93].

Аналіз рис.3 показав, що всі лінії $1/2 \cdot D(x)=f(x)$ розміщені відносно експериментальних точок з певним відхиленням. Для пояснення цих відхилень з'ясуємо можливі похибки експериментів.

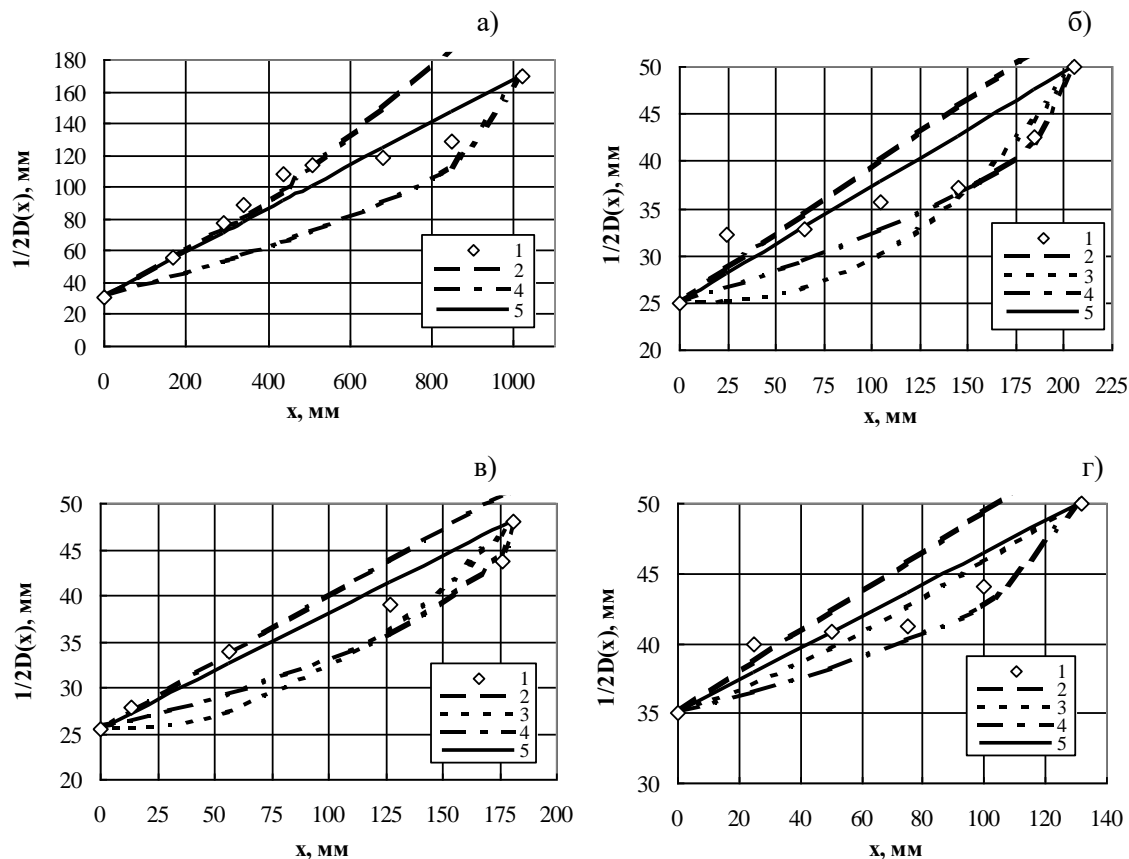


Рис.3. Профілі струменя рідини при $D/d = 5,484$ (а); $2,0$ [4] (б); $1,89$ (в); $1,429$ (г) за експериментальними даними – 1 та за формулами (1) – 2; (2) – 3; (3) – 4; (4а) – 5

На величину похибки впливають: відхилення внутрішнього діаметра трубопроводу D по довжині труби від середнього його значення; точність побудови епюр швидкостей в перерізах, які розглядаються; значення витрати рідини (газу). Неточності визначення внутрішнього діаметра трубопроводу та витрати мають систематичний характер. А похибка вимірювання полів швидкостей залежить від того, чи використовувалися вимірювальні пристрої, що є чутливими до напрямку руху потоку [5].

Вимірювання швидкостей необхідно виконувати в основному за допомогою лазерного доплерівського анемометра (ЛДА) [22, с.17], проте у міру можливості ці результати треба перевірити за допомогою інших методів [2; 22, с.17]. Використання відмінних від ЛДА методів може дати помилки у вимірюванні зворотних потоків [5]. Як бачимо з таблиці, більшість досліджень було проведено за допомогою ЛДА. Слід зазначити, що вимірювання

двоканальним і фазоінвертуючим термоанемометрами дають результати, подібні за точністю як і при використанні ЛДА [5].

Найменше (до 16,1%) відхилення від експериментальних значень має профіль струменя, збудований за формулою (4а).

Стверджується, наприклад [23], що границі струменя навіть в першому наближенні не можуть бути прийняті прямолінійними. Незважаючи на це, покажемо з якою точністю можна використовувати формулу (4а) для розрахунку профілю обмеженого струменя в раптовому розширенні труби саме в першому наближенні.

Записавши формулу (4а) як лінійну регресію експериментальних даних:

$$D(x) = a + b \cdot x, \quad (5)$$

де $a=d$; $b=2(D-d)/x_R$, отримали, що коефіцієнти кореляції були в межах 0,9217...0,9999, а середньоквадратичні відхилення – в межах 11,19...0,0325. Значущість коефіцієнта регресії b в цілому за критерієм Фішера давала довірчу ймовірність не менше 0,90.

Оскільки у формулу (4а) входить довжина x_R , необхідно з'ясувати чому вона дорівнює, якщо її дійсне значення невідоме.

Довжина x_R області рециркуляції практично не залежить від числа Рейнольдса: $x_R=(6...10) \cdot h$ при зміні Re в діапазоні від 10^3 до 10^6 [24, с.13]. Виявлено також тенденцію, що вказує на зростання довжини зони рециркуляції при збільшенні відношення площ каналу, який раптово розширюється [25].

Розглянемо формули, за якими обчислюють довжину x_R у різних літературних джерелах.

При витіканні струменя з труби круглого перерізу в квадратну камеру (при $H_k/d=1,48; 2,67; 5,12$) [26]

$$\frac{x_R}{d} = 10,2 \cdot \left[\left(\frac{H_k}{d} \right)^{0,67} - 1 \right], \quad (6)$$

де H_k – ширина камери. Заміняючи квадратну камеру круглою трубою, тобто $H_k = \frac{\sqrt{\pi} \cdot D}{2}$, маємо (при $D/d=1,67; 3,01; 5,78$):

$$\frac{x_R}{d} = 10,2 \cdot \left[\left(\frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{D}{d} \right)^{0,67} - 1 \right]. \quad (6a)$$

Для $1,3 \leq D/d \leq 2,5$ [27]

$$\frac{x_R}{h} = 8...9. \quad (7)$$

Представимо цю формулу так:

$$\frac{x_R}{d} = (4,0...4,5) \cdot \left(\frac{D}{d} - 1 \right). \quad (7a)$$

Для $1,5 \leq D/d \leq 8,0$ [28]

$$\frac{x_R}{d} = 8,8 \cdot \sqrt{\frac{D}{d} - 1}. \quad (8)$$

Для $2,42 \leq n \leq 196,0$ (що відповідає $1,56 \leq D/d \leq 14,0$) [29]

$$\frac{x_R}{d} = 2,065 \cdot n^{0,61} . \quad (9)$$

Для $1,0 \leq D/d \leq 5,0$ [30]

$$\frac{x_R}{r_o} = 6,7 \cdot \left(\frac{R}{r_o} - 1 \right) , \quad (10)$$

де r_o, R – радіус відповідно малої і великої труби. Представимо цю формулу так:

$$\frac{x_R}{d} = 3,35 \cdot \left(\frac{D}{d} - 1 \right) . \quad (10a)$$

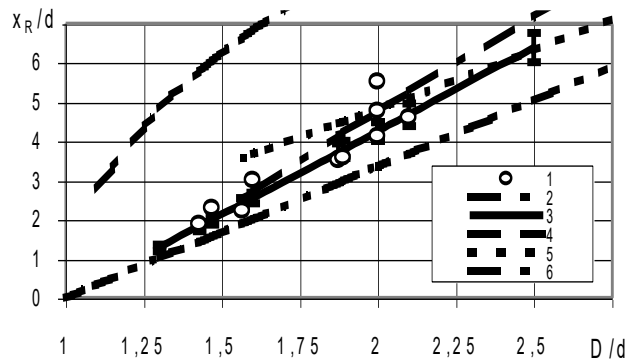


Рис.4. Порівняння довжини ділянки повторного приєднання потоку x_R : за експериментальними даними – 1 та за формулами (6a) – 2, (7a) – 3, (8) – 4, (9) – 5, (10a) – 6

З графіків на рис.4 видно, що найкраще описує експериментальні точки формула (7a), представлена як

$$\frac{x_R}{d} = (4,25 \pm 0,25) \cdot \left(\frac{D}{d} - 1 \right) .$$

Ця формула дає задовільні результати і при екстраполюванні до $D/d = 5,484$.

Висновки

Для розрахунку у першому наближенні профілю обмеженого струменя рідини в раптовому розширенні труби при $D/d \leq 5,484$ за формулою (4a) при відомих діаметрах d та D , але заздалегідь невідомій довжині ділянки повторного приєднання потоку x_R , слід застосовувати формулу (7a), що дає

$$D(x) = d + (0,235 \pm 0,015) \cdot x . \quad (5a)$$

Якщо формулу (1) представити в такому вигляді:

$$D(x) = d + 0,288 \cdot x ,$$

то видно, що діаметр обмеженого струменя ніколи не перевищить діаметр вільного затопленого струменя.

Одержану формулу (5a) можна використовувати при моделюванні повітряно-реактивних [11, 16] і ракетних [11] двигунів.

У закінченні зазначимо, що якщо б потік при наявності додатного градієнта тиску не прагнув би до відриву, то дослідникам і інженерам-гідромеханікам майже не було б що робити [31].

1. Старцев С.Б. Исследование структуры течения в замкнутых пространствах // Сиб. физ.-техн. ж. (Изв. СО АН СССР). – 1993. – Вып.3. – С.101-105. 2. Симпсон. Обзор некоторых явлений, возникающих при отрыве турбулентного потока // Теор. основы инж. расчетов: Тр. Амер. об-ва инж.-мех. – 1981. – Т.103, №4. – С.131-149. 3. Чжен П. Отрывные течения. Т.1. / Пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 299 с. 4. Будунов 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. 5. 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. 6. Кталхерман М.Г. Исследование турбулентных отрывных течений в канале, структура потока и теплопередача: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: ИТПМ СО АН СССР. – Новосибирск, 1970. 7. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. – М.: Физмат, 1970. – 216 с. 8. Иньков А.П., Ярхо С.А. К расчету местных коэффициентов гидравлического сопротивления // Науч. тр. Всес. заочн. машиностроит. ин-та. – 1973. – Вып.9. – С.167-176. 9. Горелов Г.М., Трянов А.Е. Течение при внезапном расширении канала // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1970. – №3. – С.54-62. 10. Быков В.М. Потери напора на участке переформирования скоростей потока жидкости // Гидравлические системы металлорежущих станков: Межвуз. сб. науч. тр. – 1981. – Вып.6. – С.96-101. 11. Мун, Рудингер. Распределение скорости в канале круглого сечения с внезапным расширением // Теор. основы инж. расчетов: Тр. Амер. об-ва инж.-мех. – 1977. – №1. – С.326-332. 12. So R.M.C., Yu M.H., Otugen M.V., Zhu J.Y. Rotation effect on inhomogeneous mixing in axisymmetric sudden-expansion flows // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1987. – Vol.30, №11. – P.2411-2421. 13. Кталхерман М.Г., Харитонова Я.И. Исследования распространения струи в канале // Изв. СО АН СССР. Сер. техн. наук. – 1969. – № 8, вып.2. – С.36-44. 14. Weiser N., Bartsch P., Nitsche W. On Turbulent Flow Separation in Axisymmetric Diffusers // Engineering Turbulence Modelling and Experiments: Proc. Symp. Model. and Measur. held. – Sept. 24-28, 1990. – Dubrovnik, Yugoslavia, 1990. – P.227-236. 15. Стивенсон, Томпсон, Крэйг. Лазерные измерения скорости в рециркуляционных течениях с высоким уровнем турбулентности // Теор. основы инж. расчетов: Тр. Амер. об-ва инж.-мех. – 1984. – Т.106, №2. – С.146-153. 16. Крэйг Р.Р., Неяд А.С., Хан Е.И., Шварцкопф К.Г. Метод получения неискаженных данных в сильно турбулентных потоках с помощью лазерного доплеровского анемометра // Аэрокосмическая техника. – 1987. – №9. – С.84-90. 17. Chaturvedi M.C. Flow characteristics of axisymmetric expansions // J. Hydraul. Div.: Proc. ASCE. – 1963. – Vol.89, №3, pt.1. – P.63-92. 18. Sung H.J., Jang H.C., Cho C.H. Curvature-dependent two-equation model for recirculating flows // Engineering Turbulence Modelling and Experiments: Proc. Symp. Model. and Measur. held. Sept. 24-28, 1990. – Dubrovnik, Yugoslavia, 1990. – P.33-42. 19. Freeman A.R. Laser anemometer measurements in the recirculating region downstream of a sudden pipe expansion // The accuracy of flow measurements by laser Doppler methods: Proc. LDA-Symposium, Copenhagen, 1975. – P.704-709. 20. Черепенин Н.Д. К задаче о распространении турбулентной струи в канале // Исследования по физической газовой динамике: Сб. науч. тр. – Казань: КГУ, 1983. – С.71-79. 21. Лебедев И.В. Гидравлический расчёт сжатия и растекания потока, стеснённого перемычками ГЭС. – Куйбышев: Оргэнергострой, 1957. – 68 с. 22. Итон Дж.К., Джонстон Дж.П. Обзор исследований дозвуковых турбулентных присоединяющихся течений // Ракетная техника и космонавтика. – 1981. – Т.19, №10. – С.7-19. 23. Малая Э.М. Аэродинамика, процессы горения и теплообмена ограниченных струйных течений. – Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1987. – 160 с. 24. Назарчук М.М., Панченко В.Н.

Ограниченные струи. – Киев: Наук. думка, 1981. – 212 с. **25.**Кюн Д.М. Влияние положительного градиента давления на характеристики присоединяющегося течения несжимаемой жидкости над уступом // *Ракетная техника и космонавтика.* – 1980. – Т.18, №4. – С.268-269. **26.**Миткальный В.И., Руди Ю.А., Утенков А.Ф. Исследования характеристик турбулентности в ограниченной изотермической струе. Сообщ.1 // *Изв. вузов. Чёр. металлургия.* – 1969. – №11. – С.167-170. **27.**Турбулентность / П.Брэдишоу, Т.Себеси, Г.-Г.Фернгольц и др.; Под ред. П.Брэдишоу. – М.: Машиностроение, 1980. – 343 с. **28.**Левін О.М., Баум В.О. Розміри рециркуляційної зони при раптовому розширенні потоку // *Доп. АН УРСР.* – 1958. – №10. – С.1064-1066. **29.**Гусак А.И. Распространение турбулентной струи капельной жидкости в ограниченном пространстве // *Изв. вузов. Нефть и газ.* – 1969. – №3. – С.67-71. **30.**Бридько В.К. К расчету некоторых характеристик осесимметричных стесненных струй // *Изв. вузов. Энергетика.* – 1978. – №3. – С.137-140. **31.**Дин-мл. О течении в диффузорах / Мнения // *Теор. основы инж. расчетов: Тр. Амер. об-ва инж.-мех.* – 1973. – №4. – С.68-69.