

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА им. А. В. ЛЫКОВА
Журнал основан в январе 1958 г.

ИФЖ

И
НЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

JOURNAL
OF ENGINEERING PHYSICS
AND THERMOPHYSICS

Отдельный оттиск
Offprint

Том 89, № 2
Vol. 89, No. 2

МАРТ–АПРЕЛЬ
MARCH–APRIL

2016

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в январе 1958 г.

2016. ТОМ 89, № 2 (МАРТ–АПРЕЛЬ)

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ДИСПЕРСНЫХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Шагапов В. Ш., Дударева О. В. Нелинейные эффекты фильтрации при переходных режимах работы скважины	285
Теплицкий Ю. С., Пицуха Е. А., Прокопович О. В. О движении частиц в газовом потоке при наличии тангенциального и осевого дутья	292
Елизаров Д. В., Елизаров В. В., Камалиев Т. С., Дьяконов С. Г. Математическое моделирование массопереноса при ламинарном движении капли в жидкой среде	298
Кузнецов Г. В., Феоктистов Д. В., Орлова Е. Г. Режимы растекания капли воды по подложкам с различной смачиваемостью	310
Жилин А. А., Федоров А. В. Исследование акусто-конвективной сушки мяса	316
Даулбаев Ч. Б., Бодыков Д. У., Алиев Е. Т., Мансуров З. А. Влияние электрического поля на ультразвуковой капиллярный эффект	326
Пиралишвили Ш. А., Бирфельд А. А., Степанов Е. Г., Михайлов А. С., Спесивцева Н. С. Экспериментальное исследование влияния производственных факторов на свойства торфяных брикетов	331

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛООБМЕН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Карташов Э. М. Математические модели теплопроводности с двухфазным запаздыванием	338
Таций Р. М., Пазен О. Ю. Общие краевые задачи для уравнения теплопроводности с кусочно-непрерывными коэффициентами	350
Кот В. А. Многократное интегрирование уравнения теплопроводности для ограниченного изнутри пространства	362

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Исатаев С. И., Толеуов Г., Исатаев М. С., Болысбекова Ш. А. Экспериментальное исследование трехмерных турбулентных струй, истекающих из сопла с прямоугольным выходным сечением	383
Перминов А. В., Никулин И. Л. Математическая модель процессов тепломассопереноса и диффузии магнитного поля в индукционной печи	388
Губайдуллин Д. А., Осипов П. П., Насыров Р. Р. Влияние положения частицы и коэффициента увлечения на скорость дрейфа в акустическом резонаторе	400
Молдабекова М. С., Асембаева М. К., Акжолова А. А. Экспериментальное исследование неустойчивости механического равновесия четырехкомпонентной смеси с балластными газами	407
Тютюма В. Д. Эффективность энергоразделения вихресточка	412
Singh B. and Yadav A. K. Plane Waves in a Rotating Monoclinic Magnetoelastoc Medium	417
Narla V. K., Prasad K. M., and Ramana Murthy J. V. Second Law Analysis of a Peristaltic Flow of an Incompressible Viscous Fluid in a Curved Channel	428

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ

Крайнов А. Ю., Моисеева К. М. Горение метано-воздушной смеси в щелевой горелке с инертной вставкой при теплоотдаче в окружающую среду	435
Крайнов А. Ю., Крайнов Д. А., Порязов В. А. Математическое моделирование горения смеси ультрадисперсного алюминия с водой	444
Зима В. П., Касымов Д. П. Исследование воздействия очага горения на образцы древесины с помощью ИК-диагностики	452

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЕ

Плевако Ф. В., Горбатов С. В., Давидович П. А., Приходько Е. М., Шушков С. В., Круль Л. П., Бутовская Г. В., Шахно О. В., Гусакова С. В., Королик О. В., Мазаник А. В. Осаждение функциональных покрытий из ацетилен-содержащей плазмы при атмосферном давлении	457
Гуцев С. А. Переходные явления при зондовых измерениях в плазме низкой плотности гелия и кислорода	464
Васильев С. В., Иванов А. Ю., Копыцкий А. В., Недолугов В. И. Динамика развития плазменного факела и роста кратера в ходе лазерной обработки материалов и ее диагностика	470
Тимеркаев Б. А., Петрова О. А., Сайфутдинов А. И. Самоорганизация слоистой структуры нормального тлеющего разряда	477

КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ПРОЦЕССОВ ПЕРЕНОСА

Шишкова И. Н., Крюков А. П. Приближенное решение сопряженной задачи тепло- и массопереноса через межфазную поверхность	483
---	-----

РАЗНОЕ

Батура Н. И. Об информационном содержании результатов измерений	489
Каримов А. В., Джураев Д. Р., Кулиев Ш. М., Тураев А. А. Особенности температурной чувствительности транзисторной структуры в двухполосном режиме измерения	497
Чернухо Е. В. Анализ неопределенностей на примере прямых и обратных задач теплотерии	501
Майорова И. А., Просунцов П. В., Зувев А. В. Оптимальное тепловое проектирование мультитекранной системы тепловой защиты многоразовых космических аппаратов	512
Журомский В. М. Управление экструзией	518

ИНФОРМАЦИОННАЯ ЛИНИЯ

Положение о Премиях имени академика А. В. Лыкова, присуждаемых Национальной академией наук Беларуси	523
--	-----

Подготовка оригинал-макета и сопровождение компьютерной системы в Internet осуществляется в редакции "Инженерно-физического журнала",
Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова
Национальной академии наук Беларуси
220072, г. Минск, ул. П. Бровки, 15

Ответственный за выпуск: Л. Н. Шемет

Подписано в печать 01.03.2016. Формат 60×84%. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 28,13. Уч.-изд. л. 24,91. Тираж 112 экз. Заказ 47.

Отпечатано в Республиканском унитарном предприятии «Издательский дом «Беларуская навука».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/18 от 02.08.2013.
ЛП № 02330/455 от 30.12.2013.

Ул. Ф. Скорины, 40. 220141, г. Минск.

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

УДК 532.517.4

*С. И. Исатаев, Г. Толеуов, М. С. Исатаев, Ш. А. Болысбекова***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ТУРБУЛЕНТНЫХ СТРУЙ, ИСТЕКАЮЩИХ ИЗ СОПЛА С ПРЯМОУГОЛЬНЫМ ВЫХОДНЫМ СЕЧЕНИЕМ**

Проведен подробный анализ средних динамических характеристик течения в сопле с прямоугольным выходным сечением в зависимости от параметра удлинения сопла и числа Рейнольдса и обобщены его результаты. Установлено, что профиль скорости течения на оси струи в сопле определяется параметром его удлинения и начальной скоростью струи. Предложена полуэмпирическая формула, которая хорошо описывает изменение максимальной скорости течения на основном участке трехмерной струи.

Ключевые слова: *прямоугольное сопло, параметр удлинения, осесимметричная струя, трехмерная турбулентная струя, когерентная структура.*

В работах [1–7], посвященных экспериментальному исследованию трехмерных турбулентных струй, истекающих из сопел с прямоугольным выходным сечением, был обнаружен ряд интересных особенностей: деформация поперечного сечения струи, ее анизотропия, наличие в таких струях трех областей затухания их осевой скорости (начального участка, где $U_{ax} = \text{const}$, переходного участка, где $U_{ax} \sim x^{-0.5}$ и основного участка, где $U_{ax} \sim x^{-1}$). Эти особенности развития трехмерных струй по-разному проявляют себя с изменением удлинения сопла $\lambda = a/b$, где a и b — размеры длинной и короткой сторон сопла соответственно. Указанные особенности трехмерной турбулентной струи в сопле с прямоугольным выходным сечением объясняются в основном развитием в нем когерентных структур течения [2, 8, 9], что является важным предметом исследования. Важно также продолжение исследований усредненных характеристик течения в таком сопле.

Цель настоящей работы — проанализировать экспериментальные данные об изменении усредненных характеристик течения в сопле с прямоугольным выходным сечением в зависимости от числа Рейнольдса и параметра удлинения сопла λ при сохранении неизменными остальных параметров течения.

Экспериментальные исследования проводились на установке, состоящей из вентилятора, виброгасящего перехода, успокоительной камеры и сопла с прямоугольной формой выходного сечения. Для формирования трехмерных струй применялись сменные сопла. В опытах использовались сопла, удлинения которых составляли $\lambda = 1, 2.66, 5.07, 7.61, 11, 16$ и 25.25 , а также круглое сопло. Спрофилированные по формуле Витошинского сопла имели одинаковую длину $90 \cdot 10^{-3}$ м и поджатие, близкое к 10, причем площади среза выхода всех сопел были примерно одинаковыми и равными площади круглого сопла диаметром $d_{кр} = 22.57 \cdot 10^{-3}$ м. В соответствии с этим эффективный диаметр каждого прямоугольного сопла d_e был приблизительно таким же, как диаметр круглого сопла. Распределения давления и скорости на срезах всех сопел были равномерными.

Основные измерения проводились при скоростях истечения на выходе из сопла $U_0 = 20$ и 40 м/с, что соответствовало числам Рейнольдса $3.2 \cdot 10^4$ и $6.5 \cdot 10^4$, рассчитанным по эффективному диаметру сопла $Re = U_0 \frac{d_e}{\nu}$. Для измерения средней скорости течения в сопле применялись трубка Пито и микроанометр марки ММН-240. Погрешность измерения этой скорости в основном связана с точностью показаний микроанометра. Микроанометр позволяет измерять даже малые скорости с точностью до 3%. Интенсивность турбулентности течения на выходе из сопла, оцениваемая по пульсации его продольной скорости, составляла 0.025–0.27%.

На рис. 1 представлены результаты измерений осевой скорости U_{ax} в струях, истекающих из сопел с различной величиной λ , при скорости истечения $U_0 = 20$ м/с (из сравнения площадей срезов выходов круглого и

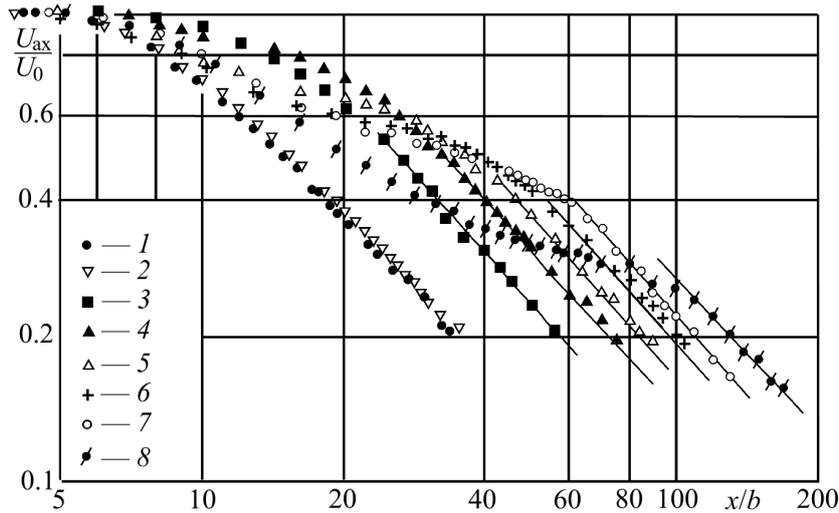


Рис. 1. Закономерности изменения осевой скорости осесимметричной струи, истекающей из круглого сопла (1), и трехмерных струй, истекающих из прямоугольных сопел с $\lambda = 1$ (2), 2.66 (3), 5.07 (4), 7.61 (5), 11 (6), 16 (7) и 25.25 (8): сплошные линии — расчет по формуле (1); точки — эксперимент

квадратного сопел, для осесимметричной струи осевая координата взята в виде $\frac{x}{b} = 1.33 \frac{x}{d_{кр}}$, где $\frac{x}{b}$ и $\frac{x}{d_{кр}}$ — относительные координаты (калибр)). Анализ данных, представленных на этом рисунке, показывает, что с ростом λ происходит постепенное изменение длины начального и переходного участков течения. С увеличением λ более четко выделяется область течения, в которой темп убывания его скорости замедляется, а затем вновь возрастает. Эта область располагается между участком, где скорость течения изменяется как в плоской струе ($U_{ax}/U_0 \sim x^{-0.5}$) и участком, на котором скорость течения убывает как в осесимметричной струе ($U_{ax}/U_0 \sim x^{-1}$). Выведено эмпирическое соотношение для расчета осевой скорости течения на основном участке трехмерной струи для $2 \leq \lambda \leq 25$:

$$\frac{U_{ex}}{U_0} = \frac{8.07\lambda^{1/3}}{\frac{x}{b} - 2.85\sqrt{\lambda - 1}} \quad (1)$$

Если результаты измерений, приведенные на рис. 1, представить в виде зависимости $x/b = f(\lambda)$ при $U_{ax}/U_0 = 0.99$, как это показано на рис. 2, то можно увидеть, что протяженность участка с выбранным уровнем скорости U_{ax} имеет максимальное значение при определенном значении λ . Установлено, что длина начального участка x_H/b струи увеличивается с 4.2 до 7 при изменении параметра удлинения в интервале $1 \leq \lambda \leq 3$ и снова уменьшается до первоначального значения $x_H/b \approx 4.2$ при $\lambda > 3$, а при $\lambda = 10$ и $\lambda > 10$ остается неизменной. Следует

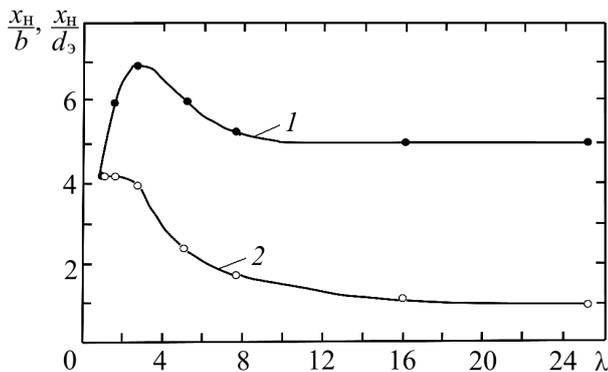


Рис. 2. Зависимость длины начального участка струи от удлинения сопла при $U_0 = 20$ м/с: 1 — x_H/b ; 2 — x_H/d_3

отметить, что если отнести длину начального участка к эффективному диаметру круга с площадью, равной площади выходного сечения прямоугольного сопла, то величина параметра $x_H/d_3 \approx 4$ сохраняется до $\lambda = 3$.

На рис. 3 приведены результаты сравнения опытных данных по затуханию осевой скорости течения в трехмерной струе в сопле с прямоугольным выходным сечением с данными для осесимметричной струи в виде зависимости безразмерной скорости течения на оси струи от отношения текущего расстояния от среза сопла к его эффективному диаметру d_3 . Видно, что на всем протяжении сопла распределение осевой скорости течения в пределе $1 \leq \lambda \leq 3$ близко к распределению скорости течения в осесимметричной струе.

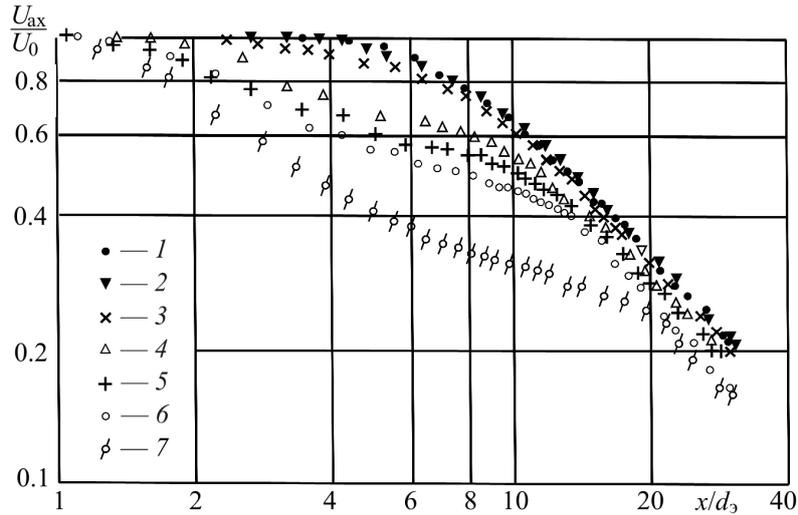


Рис. 3. Сравнение опытных данных по изменению скорости течения вдоль оси трехмерной и осесимметричной струй при $U_0 = 20$ м/с: 1 — круглое сопло; 2 — $\lambda = 2.66$; 3 — 5.07; 4 — 7.61; 5 — 11; 6 — 16; 7 — 25.25

С переходом к $\lambda = 5$ наблюдается сокращение длины начального участка струи (это хорошо иллюстрируется на рис. 2 по отношению к x_H/d_3) и увеличение темпа убывания скорости течения в ее переходной области, но при всем этом закономерность падения осевой скорости течения на основном участке такая же, как и в предыдущем случае.

В диапазоне $\lambda = 7-25$ происходит резкое сокращение длины начального участка струи, а на ее переходном участке наблюдаются течения, различные по характеру распределения их осевой скорости, но, начиная с определенного расстояния от среза сопла, в зависимости от λ все они стягиваются к одной закономерности. Из рис. 3 также видно, что с ростом параметра λ смещается вниз по потоку начало области, в которой темп убывания скорости течения пропорционален величине x^{-1} . В этой области струя распространяется как осесимметричная, но в струях, начиная с $\lambda = 7$, при тех же значениях x/d_3 скорость ниже, чем в осесимметричной.

Дальнейшее исследование показало, что увеличение скорости потока до 40 м/с (рис. 4) приводит к выпрямлению (сглаживанию) формы кривой ($U_0 = 20$ м/с), которая соответствует области течения, где темп убывания его скорости замедляется, а затем вновь возрастает. Здесь можно с уверенностью сказать, что в струе происходит четкая перестройка законов затухания осевой скорости от закономерности $U_{ax}/U_0 \sim x^{-0.5}$, характерной для плоской струи, к закономерности $U_{ax}/U_0 \sim x^{-1}$, характерной для осесимметричной струи. Это подтверждают данные как экспериментальных, так и теоретических исследований многих авторов.

На рис. 4 показано сопоставление экспериментальных данных других авторов и теоретических кривых для осевой скорости плоской и осесимметричной струй [3], полученных, соответственно, по формулам

$$\frac{U_{ax}}{U_0} = \frac{2.56}{\sqrt{\frac{x}{b} - 2}}, \tag{2}$$

$$\frac{U_{ax}}{U_0} = \frac{5.78}{\frac{x}{d} - 2}, \tag{3}$$

с нашими экспериментальными данными. В этих формулах считалось, что полюс основного участка внутри сопла лежит для плоской струи на расстоянии

$$\frac{ax_0}{b_0} = \frac{a(x - S)}{b_0} = 0.41,$$

а, для осесимметричной струи — на расстоянии

$$\frac{ax_0}{r_0} = \frac{a(x - S)}{r_0} = 0.29,$$

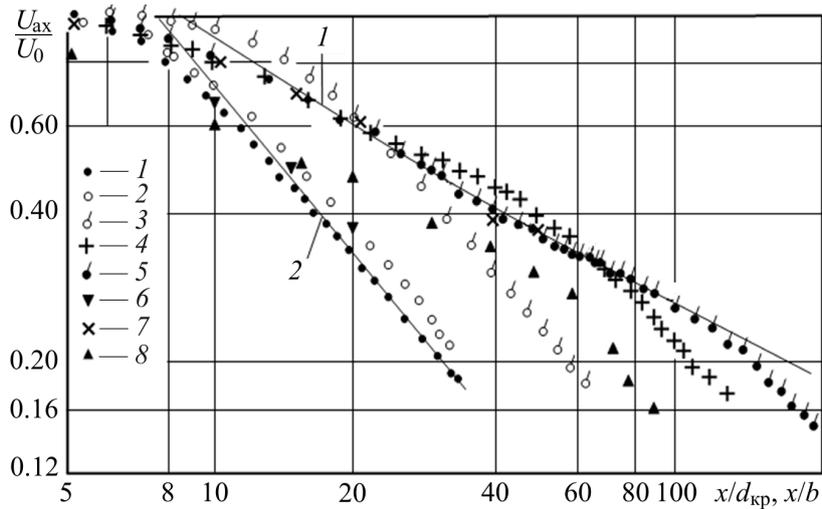


Рис. 4. Закономерности изменения осевой скорости трехмерной струи при $U_0 = 40$ м/с, рассчитанные по формулам (2) (верхняя линия) и (3) (нижняя линия): 1 — круглое сопло; 2 — $\lambda = 1$; 3 — 2.66; 4 — 11; 5 — 25.25; 6 — 1 [10]; 7 — 10 [10]; 8 — 12.4 (щелевая диафрагма [4])

где x — расстояние от полюса струи, S — расстояние от среза сопла, x_0 — расстояние от полюса до среза сопла, b_0 и r_0 — полуширина и радиус среза сопла соответственно и a — эмпирическая константа, характеризующая структуру струи: $a = 0.11$ для плоской струи и $a = 0.083$ для осесимметричной струи. Как видно из рис. 4, наблюдается хорошее согласие опытных и теоретических значений осевой скорости для данных полюсных расстояний для случая, когда струя распространяется из профилированного сопла.

Как мы упоминали ранее и как показывают результаты, представленные на рис. 4, наши экспериментальные данные и данные других авторов на переходном участке подчиняются закономерности $U_{ax}/U_0 \sim x^{-0.5}$, характерной для плоской струи. По-видимому, именно этим обусловлено отсутствие в других работах [4, 5] упоминания о наличии участка с замедленным темпом падения скорости течения (при $U_0 \leq 20$ м/с), поскольку эксперименты в этих работах проводились при скоростях потока от 40 до 100 м/с.

Если приведенные выше результаты ($U_0 = 40$ м/с) сравнить с данными для осесимметричной струи в виде зависимости U_{ax}/U_0 от x/d_3 , то, как видно из рис. 5, различия в уровнях скорости течения при постоянстве x/d_3 для области, где струя распространяется как осесимметричная, будут уменьшенными по сравнению со случаем, когда скорость потока составляет $U_0 = 20$ м/с. По-видимому, это объясняется уменьшением толщины пристенных пограничных слоев при увеличении Re и соответствующим уменьшением масштаба возникающих вихрей, способствующих увеличению дальности струи.

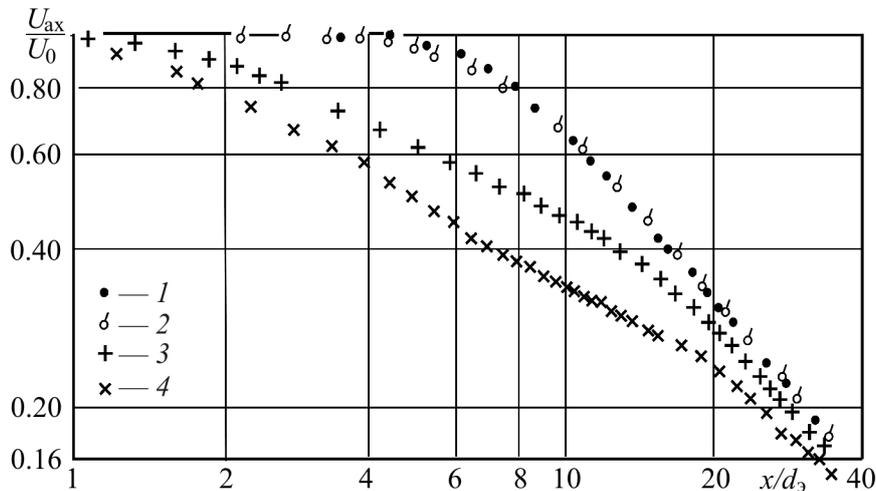


Рис. 5. Сравнение опытных данных по затуханию осевой скорости трехмерной и осесимметричной струй при $U_0 = 40$ м/с: 1 — круглое сопло; 2 — $\lambda = 2.66$; 3 — 11; 4 — 25.25

Таким образом, экспериментальное исследование аэродинамики трехмерных турбулентных струй, истекающих из сопла с прямоугольным выходным сечением с начальной скоростью $U_0 = 20\text{--}40$ м/с, в широких пределах удлинения сопла $\lambda = 125$ показало, что трехмерная струя до значений $\lambda \leq 3$ ведет себя как осесимметричная струя по закону затухания осевой скорости на всем протяжении ее распространения. Начиная с $\lambda = 7$, наблюдается другая динамика. Установлено, что в диапазоне $\lambda = 7\text{--}25$ на переходном участке при небольшой начальной скорости выделяется область течения, в которой темп убывания осевой скорости замедляется, а затем вновь возрастает. Эта область располагается между участками, где изменяются скорости как плоской, так и осесимметричной струй. С увеличением начальной скорости струи до значений, превышающих 20 м/с, происходит постепенное выпрямление формы кривой, соответствующей области течения, в которой темп убывания скорости течения ранее замедлялся. Предложена полуэмпирическая формула для расчета максимальной скорости течения на основном участке трехмерной струи в интервале $2 \leq \lambda \leq 25$. Показано, что длина начального участка x_n/b струи увеличивается с 4 до 7 в интервале $1 \leq \lambda \leq 3$ и при $\lambda > 3$ снова уменьшается до первоначального значения $x_n/b = 4$ при $\lambda = 10$, а и при $\lambda > 10$ остается неизменной.

Обозначения

a, b и $\lambda = a/b$ — длина, ширина и удлинение выходного среза сопла, м; $d_3 = 2\sqrt{ab/\pi}$ — эффективный диаметр круга площадью, равной площади выходного сечения прямоугольного сопла, м; $d_{кр}$ — диаметр выходного сечения круглого сопла, м; $\sqrt{U_0^2}$ — продольная пульсация скорости на срезе сопла, м/с; U_0 — скорость на выходном сечении сопла, м/с; U_{ax} — скорость на оси струи, м/с; x — координатная ось, вдоль которой распространяется течение, м; $x/b, x/d_3$ — относительные координаты (калибр); x_n — длина начального участка струи, м; $\varepsilon_0 = \frac{\sqrt{U_0^2}}{U_0}$ — интенсивность турбулентности; ν — кинематическая вязкость среды, м²/с. Индексы: кр — круглый; н — начальный; э — эффективный; 0 — значение параметра у кромки сопла; ах — осевой.

Литература

1. Агулыков А., Джаугаштин К. Е., Ярин Л. П. Исследование структуры трехмерных турбулентных струй. *Изв. АН СССР. МЖГ*. 1975. № 6. С. 13–21.
2. Уханова Л. Н., Войтович Л. Н. Некоторые особенности развития когерентных структур течения на начальном участке трехмерных турбулентных струй. *Инженерно-физический журнал*. 1984. Т. 47, № 4. С. 537–543.
3. Абрамович Г. Н., Гиршович Т. А., Крашенинников С. Ю., Секундов А. Н., Смирнова И. П. *Теория турбулентных струй*. 2-е изд. перераб. и доп. Под ред. Г. Н. Абрамовича. Москва: Наука, 1984.
4. Крашенинников С. Ю., Рогальская Е. Г. Распространение струй из прямоугольных сопел, свободных и вблизи экрана. *Изв. АН СССР. МЖГ*. 1979. № 4. С. 39–48.
5. Sforza P. M. and Trentacoste N. Further experimental results for three-dimensional free jets. *AIAA J*. 1967. Vol. 5, No. 5. Pp. 885–890.
6. Шепелев И. А., Гельман Н. А. Универсальные формулы для расчета скорости и температуры вентиляционных струй, истекающих из прямоугольных отверстий. *Водоснабжение и санитарная техника*. 1966. № 7. С. 19–21.
7. Исатаев С. И., Тарасов С. Б., Толеуов Г. Экспериментальное исследование трехмерных турбулентных струй, распространяющихся из сопел с прямоугольным выходным сечением. *Вестн. КазГУ. Сер. физическая*. 1995. № 2. С. 94–100.
8. Faghani E., Maddahian R., Faghani P., and Farhanieh B. Numerical investigation of turbulent free jet flows issuing from rectangular nozzles: the influence of small aspect ratio. *Achiv. Appl. Mech*. 2010. Vol. 80, No. 7. Pp. 727–745.
9. Lhendup Namgyal and Joseph W. Hall. Coherent streamwise vortex structures in the near-field of the three-dimensional wall jet. *J. Fluid. Eng*. 2013. Vol. 135, No. 6. Pp. 120–126.
10. Богомолов Д. В., Сегуха А. В. О численном моделировании трехмерных вихревых течений идеальной жидкости в безграничной области изолированными вихревыми элементами. *Науч. вестн. МГТУ ГА. Сер. Аэромеханика и прочность*. 2008. № 125(1). С. 73–78.