

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 93, № 1

Vol. 93, No. 1

ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ

JANUARY–FEBRUARY

2020

ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в январе 1958 г.

2020. ТОМ 93, № 1 (ЯНВАРЬ–ФЕВРАЛЬ)

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ ПЕРЕНОСА

Ушаков А. А., Орлов А. А., Совач В. П. Влияние потоков разделительного каскада на продолжительность переходного процесса 3

ТЕПЛОПРОВОДНОСТЬ И ТЕПЛООБМЕН В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Формалев В. Ф., Карташов Э. М., Колесник С. А. О динамике движения и отражения температурных солитонов при волновом теплопереносе в ограниченных областях 11

Конюхов Г. В., Бухаров А. В., Конюхов В. Г. К проблеме отвода низкопотенциального тепла от космических систем большой мощности 18

Ахременков Ан. А., Бойков С. Ю., Цирлин А. М. Необратимость процессов теплообмена в двухпоточных ячейках с различной гидродинамикой потоков 30

Акулич П. В., Слижук Д. С. Термогидродинамика распылительной сушильной установки с конвективно-радиационным энергоподводом 41

Басок Б. И., Новиков В. Г., Давыденко Б. В., Беляева Т. Г., Новицкая М. П., Сороковой Р. Я. Радиационно-конвективный теплообмен здания с окружающей средой при воздействии солнечного излучения 48

Осипов А. Н., Тхостов М. Х.-М., Меженная М. М., Стетюкевич Н. И., Шевцов В. Ф., Кульчицкий В. А., Драпеца В. Ю., Давыдов М. В., Котов Д. А. Инфракрасная кабина с биотехнической обратной связью для восстановления функциональных резервов человеческого организма 58

Knurr D. C., Cotta R. M., and Naveira-Cotta C. P. Conjugate Heat Transfer: Analysis via Integral Transforms and Eigenvalue Problems 65

НАНОСТРУКТУРЫ

Авраменко А. А., Ковецкая М. М., Тыринов А. И., Ковецкая Ю. Ю. Особенности использования наножидкостей для интенсификации теплообмена при кипении 78

Шашок Ж. С., Прокочук Н. Р., Усс Е. П., Жданок С. А. Эластомерные композиции с высокодисперсными углеродными добавками 88

Temirgaliyeva T. S., Nazhipkyzy M., Nurgain A., Turganbay A., Dinistanova B., Mansurov Z. A. Synthesis of Multiwall Carbon Nanotubes by the CVD Method and Their Functionalization 96

Футько С. И., Шулицкий Б. Г., Лабунов В. А., Ермолаева Е. М. Моделирование самоорганизующегося синтеза гибридных наноструктур при химическом парофазном осаждении углеводородов на переходных металах 100

Аульченко С. М., Картаев Е. В. Моделирование одностадийного синтеза композитных частиц типа ядро–оболочка при раздельном окислении тетрахлоридов титана и кремния в плазмохимическом реакторе 114

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ПРОЦЕССАХ ГОРЕНИЯ

Антонов Д. В., Жданова А. О., Кузнецов Г. В., Копылов Н. П., Хасанов И. Р., Шлегель Н. Е. Характеристики разлета фрагментов пиролизующихся лесных горючих материалов перед заградительной полосой при воздействии воздушного потока 120

ГИДРОГАЗОДИНАМИКА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

Дмитренко А. В. Формирование спектра турбулентности в инерционном интервале на основе теории стохастических уравнений и эквивалентности мер 128

Ингель Л. Х. Оценка амплитуды нелинейной "антиконвекции" 134

Исаев С. А., Чорный А. Д., Жукова Ю. В., Фролов Д. П., Юнаков Л. П. Согласованные граничные условия на входе в расчетную область на примере моделирования ламинарного обтекания пластинки.....	138
Замураев В. П., Калинина А. П. Управление формированием околосзвуковой области в осесимметричном сверхзвуковом потоке с помощью струи и пристеночного подвода энергии.....	143
Герасимов А. В., Дмитриев С. М., Добров А. А., Доронков Д. В., Пронин А. Н., Рязанов А. В., Солнцев Д. Н., Хробостов А. Е. Расчетно-экспериментальные исследования процессов течения потока теплоносителя в области направляющего канала за перемешивающими решетками ТВС	151
Ищенко А. Н., Акиншин Р. Н., Борисенков И. Л., Глазунов А. А., Жильцов К. Н., Касимов В. З., Тырышкин И. М., Чупашев А. В. Математическое моделирование движения суперкавитирующих ударников при подводном старте.....	161
Унаспеков Б. А., Сабденов К. О., Ерзада М., Ауелбеков С. Ш., Таубалдиева А. С., Сейтказиев О. Д. Исследование свободного конвективного движения воздуха в отапливаемом помещении.....	170
Исатаев М. С., Толеуов Г., Султан М. Экспериментальное исследование свободной турбулентной воздушной струи, истекающей из сопла квадратной формы	178
Hazarika G. C., Phukan Bandita, and Ahmed Sahin. Effect of Variable Viscosity and Thermal Conductivity on Unsteady Free Convective Flow of a Micropolar Fluid past a Vertical Cone	184

ТЕПЛО- И МАССОПЕРЕНОС В ДИСПЕРСНЫХ И ПОРИСТЫХ СРЕДАХ

Филиппов А. И., Кабиров И. Ф., Левина Т. М. Нестационарные поля пористости и плотности на стадии отбора раствора кислоты из карбонатного пласта	192
Храмченков Э. М., Храмченков М. Г. Математическая модель многофазной неизотермической фильтрации в деформируемых пористых средах с совместно протекающей химической реакцией.....	197
Шагапов В. Ш., Нагаева З. М. Приближенное решение задачи об упругом режиме фильтрации в трещине, находящейся в нефтяном пласте	206
Сандуляк А. В., Сандуляк А. А., Ершова В. А., Сандуляк Д. А., Полисмакова М. Н., Киселев Д. О. Замечания к выбору дисперсного образца для определения магнитной восприимчивости образца и частиц дисперсной фазы	216

ПРОЦЕССЫ ПЕРЕНОСА В РЕОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДАХ

Исмайылов Г. Г., Искендеров Э. Х., Исмайылова Ф. Б., Зейналова Г. А. Управляемые способы гашения пульсаций давления в мультифазных трубопроводах.....	222
--	-----

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Ковалев Ю. М. Уравнения состояния для описания изотермического сжатия некоторых молекулярных кристаллов нитросоединений	229
Головин Д. Ю., Дивин А. Г., Самодуров А. А., Тюрин А. И., Головин Ю. И. Новый экспресс-способ определения коэффициента температуропроводности материалов и готовых изделий	240

РАЗНОЕ

Нерубайло Б. В. К численному решению задачи о напряженном состоянии термоупругих физически ортотропных цилиндрических оболочек.....	248
--	-----

ИНФОРМАЦИОННАЯ ЛИНИЯ

Положение о премиях имени академика А. В. Лыкова, присуждаемых Национальной академией наук Беларуси.....	254
---	-----

Ответственный за выпуск: Л. Н. Шемет

Подписано в печать 03.01.2020. Формат 60×84¹/₈. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 29,76. Уч.-изд. л. 27,26. Тираж 76 экз. Заказ № 6

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.

220141, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 40

УДК 532.517.4

*М. С. Исатаев, Г. Толеуов, М. Султан***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СВОБОДНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ВОЗДУШНОЙ СТРУИ, ИСТЕКАЮЩЕЙ ИЗ СОПЛА КВАДРАТНОЙ ФОРМЫ**

Проведено экспериментальное исследование средних характеристик течения в турбулентной свободной воздушной струе, истекающей из сопла квадратной формы. Исследования проводились как при наличии, так и при отсутствии внешнего акустического воздействия.

Ключевые слова: сопло с квадратным выходным сечением, параметр удлинения, турбулентная свободная воздушная струя, акустическое воздействие.

До настоящего времени остаются малоизученными турбулентные свободные струи в дозвуковом диапазоне, распространяющиеся из сопла с квадратным выходным сечением. Если две противоположные стороны выходного сечения квадратной формы сохранять постоянными, а перпендикулярные им две стороны удлинять, то мы получим прямоугольное сопло (определяющий параметр — параметр удлинения λ). Струя, исходящая из такого сопла, называется трехмерной. Трехмерные турбулентные свободные струи хорошо изучены [1–13]. В свою очередь для струй, распространяющихся из сопел с квадратной формой ($\lambda = 1$), можно привести лишь несколько работ, охватывающих это направление [5, 10, 14, 15]. Из-за недостаточной изученности таких струй в данной работе было уделено внимание этой проблеме.

Экспериментальные исследования проводились на установке, состоящей из нагнетателя воздуха, виброгасящего перехода, успокоительной камеры и сопла с квадратным выходным сечением. Для формирования струи применялось сопло, спрофилированное по формуле Витошинского, которое имело длину, равную $90 \cdot 10^{-3}$ м, и поджатие, близкое к 10. При этом площадь среза выхода сопла была примерно равной площади круглого сопла диаметром $d_{кр} = 22.57 \cdot 10^{-3}$ м. Поэтому эффективный диаметр сопла d_3 был приблизительно такой же, как диаметр круглого сопла. Распределения давления и скорости на срезах сопла были равномерными. Средняя скорость течения в сопле измерялась с использованием трубки Пито и микроманометра марки ММН-240. Погрешность измерения этой скорости определялась в основном с точностью показаний микроманометра, который позволял измерять даже малые скорости с точностью до 3%. Интенсивность турбулентности ϵ_0 течения на выходе из сопла, оцениваемая по пульсации его продольной скорости, составляла 0.025–0.27%. Корневая часть струи располагалась в рабочей части теневого прибора ИАБ-451, оборудованного таким образом, чтобы можно было наблюдать теньевую мгновенную картину течения. С помощью трехмерного координатника трубка Пито и датчики перемещались по трем осям симметрии сопла. Основные измерения проводились при скорости истечения струи из сопла $U_0 \approx 20$ м/с, что соответствовало числу Рейнольдса $3.25 \cdot 10^4$, рассчитанному по эффективному диаметру сопла: $Re = U_0 d_3 / \nu$.

Измерения распределения скорости проводились с использованием микроманометра, который перед выполнением работ был протарирован. Профили скорости на выходе из сопла во всех случаях были равномерными. На рис. 1 показаны некоторые непрерывные записи профилей U/U_0 на поверхности выходного сечения круглых и квадратных сопел. Для учета влияния пограничного слоя, образующегося на внутренней боковой поверхности сопла, при определении профиля скорости на выходном сечении использовалась микротрубка с плоским краем, изготовленная из тонкостенной трубки с толщиной стенки, равной 0.05 мм. Выходное отверстие микротрубки максимально сжато и имеет внутренний диаметр, равный $d = 0.10$ мм.

Казахский национальный университет им. аль-Фараби. Казахстан, 050040, просп. аль-Фараби, 71; э-почта: Muhtar.Isataev@kaznu.kz. Поступила 04.06.2018.

Как показывают опыты, статическое давление свободной струи не изменяется и равно давлению окружающей среды. В результате во всех сечениях потока полный импульс должен оставаться постоянным. Для круглой струи можно записать:

$$2\pi\rho \int_0^{\delta} yU^2 dy = P_{\text{п}x} = \text{const} , \quad (1)$$

где $P_{\text{п}x}$ — полный импульс струи в сечении x . Такой же результат получен на основе эксперимента и для струи, выходящей из сопла квадратной формы (рис. 2). После некоторых преобразований [13] из уравнения (1) получаем, что скорость осесимметричной затопленной струи в центре сечения обратно пропорциональна расстоянию до полюса:

$$U_m = \frac{\text{const}}{x} . \quad (2)$$

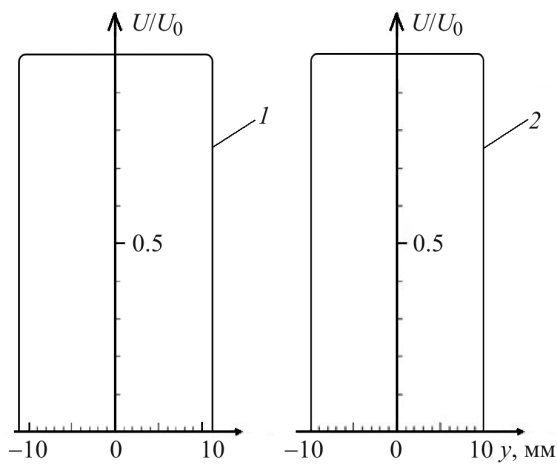


Рис. 1. Профили скорости на выходе из сопла: 1 — сопло с круглым выходным сечением ($d_{\text{кр}} = 22.57$ мм); 2 — сопло с квадратным выходным сечением ($\lambda = 1$)

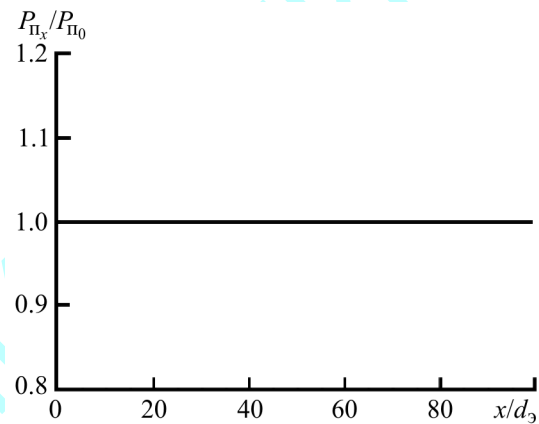
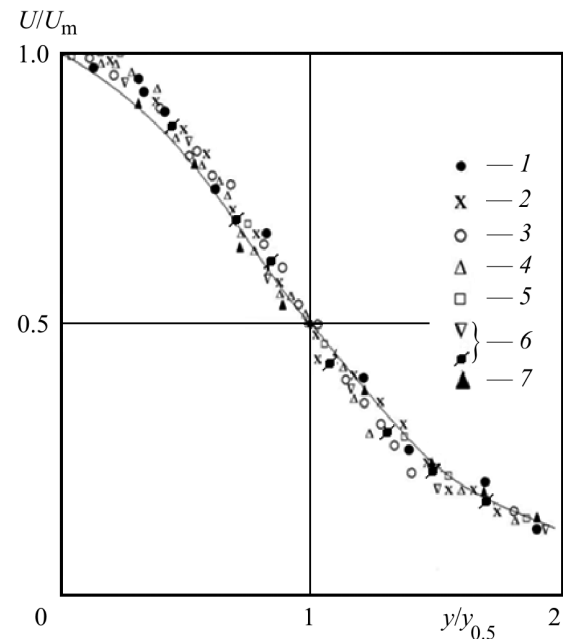


Рис. 2. Постоянный импульс по направлению оси координат x : $P_{\text{п}x}$ — полный импульс струи в сечении x ; $P_{\text{п}0}$ — полный импульс на выходе из сопла

Рис. 3. Профили скоростей в поперечных сечениях свободных струй, вытекающих из сопел с выходными сечениями квадратной и круглой форм: 1 — $x/b = 6$, $\lambda = 1$; 2 — $x/b = 10$, $\lambda = 1$; 3 — $x/b = 15$, $\lambda = 1$; 4 — $x/b = 20$, $\lambda = 1$; 5 — $x/b = 25$, $\lambda = 1$; 6 — круглое сопло [13]; 7 — круглое сопло [14]; $U_0 = 20.9$ м/с; $f = 0$; $y_{0.5}$ — координата соответствующая значению $U_m/2$; сплошная линия — данные работы [10]



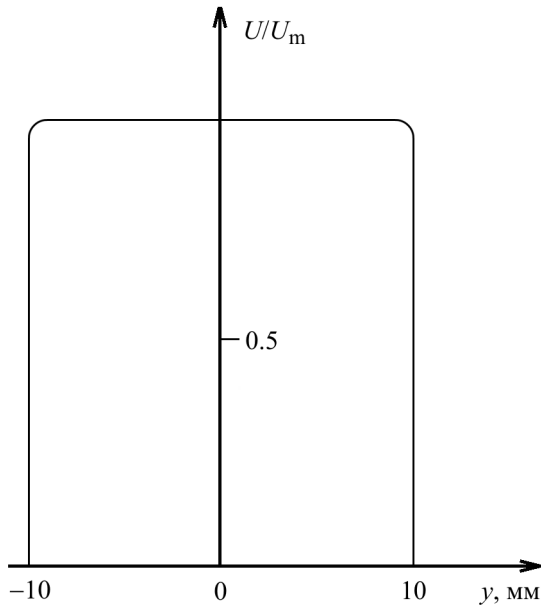


Рис. 4. Распределение скорости на выходе сопла с квадратным выходным сечением при $U_0 = 20.3 \text{ м/с}$, $\lambda = 1$, $x/b = 0$

Дальнейшее исследование воздушной струи, распространяющейся из сопла с квадратным выходным сечением, заключается в изучении профилей скорости струи в поперечных сечениях без внешнего воздействия. Результаты такого эксперимента показаны на рис. 3. Из рисунка видно, что универсальность профилей скорости в поперечных сечениях (аффинность) начинается с 6-ти калибров ($x/b = 6$). Для сравнения на рисунке приведены результаты измерения скорости осесимметричной воздушной струи в поперечных сечениях. Данные взяты из трудов, указанных в работе [13]. Ясно видно, что закономерности распределения скорости одинаковы в обоих случаях. Кроме того, измеренные продольные составляющие скорости показывают удовлетворительное согласие с результатами и других авторов [14]. Таким образом, из анализа результатов можно сделать вывод, что наши экспериментальные данные хорошо согласуются с данными теоретических работ [10].

На рис. 4–6 представлены устоявшиеся профили скорости в зоне потенциального ядра свободной воздушной струи. Основная разница между нашими результатами исследования и экспериментальными данными других авторов [5, 15] в том, что профили скорости в нашем исследовании соответствуют нормальным условиям, а профиль скорости в [5, 15] подобен седлообразному ($x/d_3 = 0.28$).

На рис. 7 показаны распределения осевых скоростей свободных турбулентных струй, вытекающих из сопел с выходными сечениями квадратной и круглой (осесимметричная струя) форм. Начальная скорость струи около 21 м/с. Результаты эксперимента соответствуют случаю, когда нет воздействия на струю. Как видим из рисунка, изменение осевых скоростей в обоих случаях подчиняется одинаковой закономерности. Сплошная линия на рисунке — это выведенное эмпирическое соотношение для расчета осевой скорости течения на основном участке струи для $\lambda = 1$:

$$\frac{U_m}{U_0} = \frac{8.07(\lambda - 0.19)^{1/3}}{\frac{x}{b} - 2.85\sqrt{\lambda} - 1}. \quad (3)$$

Здесь осевая координата для осесимметричной струи взята равной $\frac{x}{b} = 1.33 \frac{x}{d_{кр}}$. Как видим из рисунка, теоретическая прямая хорошо согласуется с результатами эксперимента. Аналитически подобранная формула (3) соответствует зависимости (2), которая учитывает изменение осевой скорости на основном участке осесимметричной струи.

На рис. 8 приведены данные по изменению осевой скорости свободной турбулентной струи, вытекающей из сопла с выходным сечением квадратной формы, как при наличии внешнего акустического воздействия на воздушную струю, так и без него. Скорость струи 21 м/с. Из рисунка видно, что изменение осевой скорости в обоих случаях соответствует одинаковой закономерности. Из этого можно сделать вывод, что внешнее акустическое воздействие не оказывает влияния на распределение темпа падения осевой скорости свободной струи, вытекающей из сопла квадратной формы.

Изменения осевой скорости свободной струи сравнивались по разным числам Рейнольдса. Полученные результаты показаны на рис. 9 — изменение осевой скорости на основном участке в обоих случаях идет по одинаковой закономерности и описывается по формуле (3).

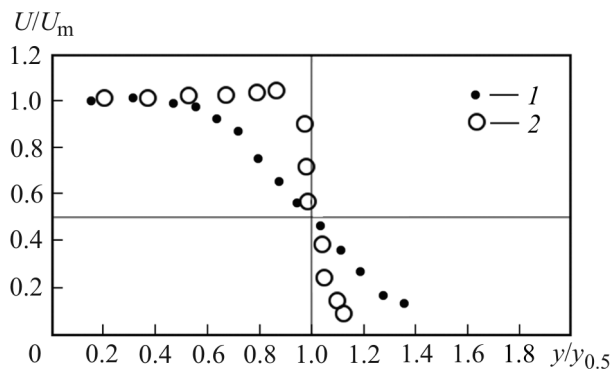


Рис. 5. Поперечные профили скорости в плоскости yz для струи, вытекающей из сопла с выходным сечением квадратной формы при $U_0 = 20.3$ м/с: 1 — $x/b = 2$, эксперимент; 2 — $x/d_3 = 0.28$ [15]

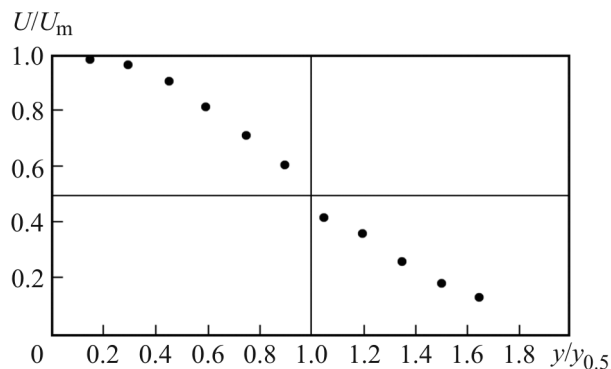


Рис. 6. Поперечные профили скорости в плоскости yz для струи, вытекающей из сопла с выходным сечением квадратной формы при $x/b = 4$, $U_0 = 20.3$ м/с

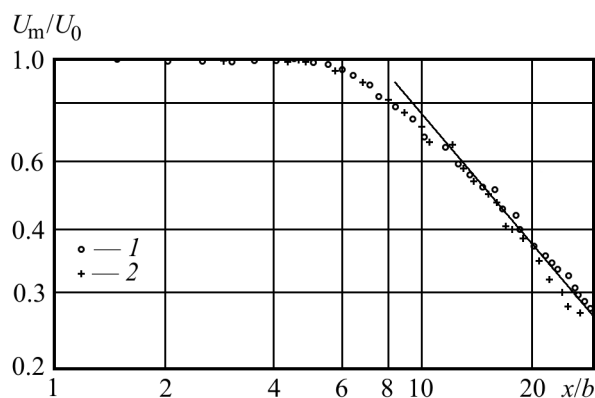


Рис. 7. Изменение осевой скорости: 1 — $f = 0$, $\lambda = 1$, $U_0 = 20.9$ м/с; 2 — $f = 0$, круглое сопло, $U_0 = 20.47$ м/с

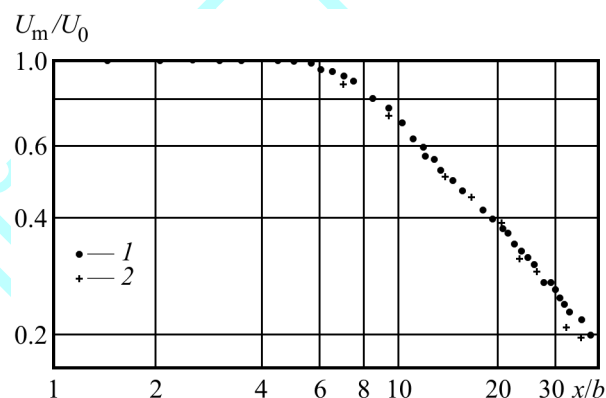


Рис. 8. Изменение осевой скорости: 1 — $f = 0$; 2 — $f = 421$ Гц; $\lambda = 1$; $U_0 = 20.9$ м/с

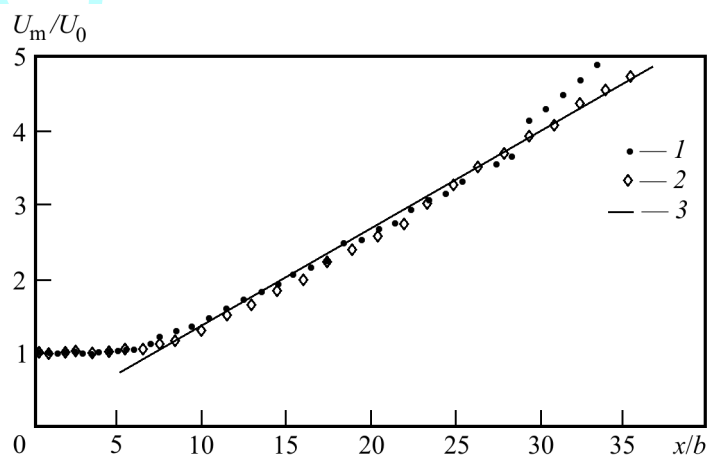


Рис. 9. Сравнение осевой скорости при разных числах Рейнольдса для $\lambda = 1$: 1 — 20 м/с ($Re = 3.25 \cdot 10^4$); 2 — 30 м/с ($Re = 4.5 \cdot 10^4$); 3 — расчет по формуле (3)

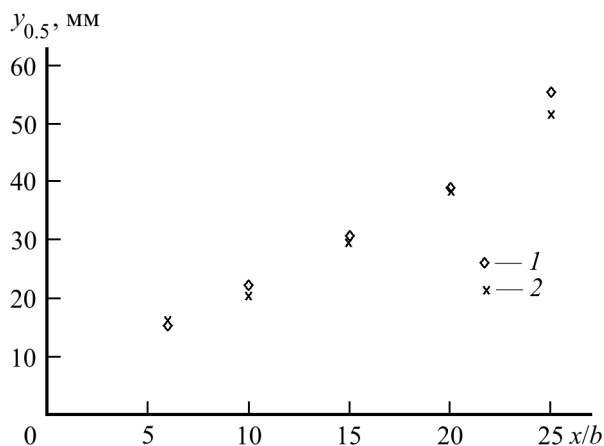


Рис. 10. Сравнение характерных полуширин $y_{0.5}$ поперечных профилей скорости в плоскости xy : 1 — $f=0$; 2 — $f=421$ Гц при $\lambda = 1$

На рис. 10 приведено сравнение характерных полуширин $y_{0.5}$ (закономерность расширения границ свободной струи) поперечных профилей скорости в плоскости xy при наличии и отсутствии внешнего воздействия. Расширение границ в обоих случаях соответствует одной закономерности.

Обозначения

a, b — длина и ширина выходного среза сопла, м; $d_3 = 2\sqrt{ab/\pi}$ — эффективный диаметр круга площадью, равной площади выходного сечения квадратного сопла, м; $d_{кр}$ — диаметр выходного сечения круглого сопла, м; f — частота акустического воздействия, Гц; U_0 — скорость на выходном сечении сопла, м/с; U — продольная составляющая скорости, м/с; U_m — скорость на оси струи, м/с; x — координатная ось, вдоль которой распространяется поток, м; x/b и $x/d_{кр}$ — относительная координата (калибр); y — поперечная координата, м; $y_{0.5}$ — поперечная координата, где скорость равна половине максимальной скорости ($U_m/2$), м; δ — радиус внешней границы потока, м; $\varepsilon_0 = \frac{\sqrt{U_0^2}}{U_0}$ — интенсивность турбулентности; $\sqrt{U_0^2}$ — продольная пульсация скорости на срезе сопла, м/с; $\lambda = a/b$ — удлинение выходного среза сопла; ρ — плотность вещества, кг/м³; ν — кинематическая вязкость среды, м²/с. Индексы: 0 — значение параметра у кромки сопла; кр — круглый; н — начальный; п — полный; э — эффективный; т — осевой.

Литература

1. Trentacoste N., Sforza P. M. Further experimental results for three-dimensional free jets. *AIAA J.* 1967. Vol. 5, No. 5. Pp. 885–890.
2. Sfeir A. A. The velocity and temperature fields of rectangular jets. *Int. J. Heat Mass Transf.* 1976. Vol. 19, No. 11. Pp. 1289–1297.
3. Крашенинников С. Ю., Рогольская Е. Г. Распространение струй из прямоугольных сопел, свободных и вблизи экрана. *Изв. АН СССР. МЖГ.* 1979. № 4. С. 39–48.
4. Абрамович Г. Н. О деформации поперечного сечения прямоугольной турбулентной струи. *Изв. АН СССР. МЖГ.* 1983. № 1. С. 54–63.
5. Quinn W. R. Turbulent free jet flows issuing from sharp-edged rectangular slots: The influence of slot aspect ratio. *Exp. Thermal Fluid Sci.* 1992. Vol. 5, No. 2. Pp. 203–215.
6. Wilson R. V., Demuren A. O. Numerical simulation of turbulent jets with rectangular cross-section. *ASME FED.* 1996. No. 238. Pp. 121–127.
7. Holdo A. E., Simpson B. A. F. Simulation of high-aspect-ratio jets. *Int. J. Numer. Methods Fluids.* 2002. Vol. 39, No. 4. Pp. 343–359.
8. Rembold B., Adams N. A., Kleiser L. Direct numerical simulation of a transitional rectangular jet. *Int. J. Heat Fluid Flow.* 2002. Vol. 23, Issue 5. Pp. 547–553.
9. Berg J. R., Ormiston S. J., Soliman H. M. Prediction of the flow structure in a turbulent rectangular free jet. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* 2006. Vol. 33, No. 5. Pp. 552–563.
10. 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. *Arch. Appl. Mech.* 2010. Vol. 80, No. 7. Pp. 727–745.

11. **Исатаев С. И., Толеуов Г., Исатаев М. С., Болысбекова Ш. А.** Экспериментальное исследование трехмерных турбулентных струй, истекающих из сопла с прямоугольным выходным сечением. *Инженерно-физический журнал*. 2016. Т. 89, № 2. С. 383–387.
12. **Исатаев М. С., Толеуов Г., Есеналина К. А.** Экспериментальное исследование распространения трехмерных турбулентных струй из прямоугольных сопел. *Инженерно-физический журнал*. 2017. Т. 90, № 6. С. 1543–1548.
13. **Абрамович Г. Н., Гиршович Т. А., Крашенинников С. Ю.** и др. *Теория турбулентных струй*. Изд. 2-ое перераб. и доп. Под ред. Г. Н. Абрамовича. Москва: Изд-во "Наука", 1984.
14. **Tsuchiya Y., Horikoshi C., Sato T.** On the spread of rectangular jets. *Exp. Fluids*. 1986. Vol. 4, Issue 4. Pp. 197–204.
15. **Quinn W. R., Militzer J.** Experimental and numerical study of a turbulent free square jet. *Phys. Fluids*. 1988. Vol. 31, Issue 5. Pp. 1017–1025.

АВТОРСКИЙ ОТТИСК