

Аннотация работы:

Для изучения структуры струйных течений решены уравнения Навье–Стокса с помощью методов прямого численного моделирования и моделирования крупных вихрей. Разработаны новые вычислительные технологии управления течением при различных условиях, и получены новые результаты расчета вихревой структуры свободных и импактных струй. Выполнена проверка влияния параметров численной реализации на точности получаемых данных. Изучены возможности управления потоком при наложении возмущений различной амплитуды и частоты (осевых и спиральных колебаний, поперечных вибраций сопла, их комбинаций) на поле скорости струи, вытекающей со скоростью U из отверстия диаметром D . Исследованы эффекты изменения входного профиля скорости и вязкости текучей среды.

Тема работы:

Моделирование струй и управление потоком

Состав коллектива:

Яковенко Сергей Николаевич, д.ф.-м.н., доцент, в.н.с. ИТПМ СО РАН (основное место работы), профессор кафедры аэрофизики и газовой динамики ФФ НГУ.
Шевченко Антон Константинович, аспирант ИТПМ СО РАН (2018-2022).

Информация о грантах:

1. Проект РФФИ 20-38-90256 «Исследование вихревой структуры струйных течений и цифровые модели управления потоком» (2020-2022, рук. – Яковенко С.Н.)
2. Проект РНФ 23-27-00310 «Численные исследования струйных течений и развитие оптимальных методов управления потоком» (2023-2024, рук. – Яковенко С.Н.)

Научное содержание работы:

1. Постановка задачи (актуальность, цели и задачи, новизна).

В настоящее время возрастает интерес к струйным течениям [1-4], связанный с развитием технологий микроэлектромеханических систем и водородной энергетики, где основное внимание уделяется вопросам струйного истечения из различных устройств и возможностям влиять на него с помощью методов управления. Например, наложение акустического поля вызывает появление вихревых структур, способствующих росту степени смешения воздуха с топливом и устойчивости пламени, снижению температуры, длины пламени и эмиссии вредных выбросов [3-4]. Можно отметить и применение пульсирующих микроструй для воздействия на основные источники шума от самолетов – крупные турбулентные вихри в выхлопных струях авиадвигателей. Изучение струй при вдуве-отсосе через различные отверстия, пористые и перфорированные стенки актуально для управления структурой течений и теплообменом. Такое управление используют для эффективной вентиляции и охлаждения газовых турбин, в микроэлектронике и других отраслях, а также при введении актуаторов, влияющих на пограничные слои вокруг обтекаемых тел и предназначенных для снижения сопротивления транспортных средств и экономии топлива.

Цель работы – изучение особенностей вихревой структуры, развития неустойчивости и турбулентности в свободных и импактных струях из отверстий различной конфигурации, возможностей управления потоком путем введения возмущений частотой f в поле скорости,

разработка современных вычислительных технологий управления струйными течениями, взаимодополняющих физические эксперименты в лабораторных условиях. Известные из литературы примеры экспериментов по управлению течением в струях относятся к относительно небольшим диапазонам чисел Рейнольдса $Re = UD/\nu$, Струхала $St = fD/U$ и к определенным способам воздействия на поток. Новизна исследования состоит в расширении этих диапазонов, выяснении влияния амплитуды возмущений, вида источников возмущений.

2. Современное состояние проблемы.

Исследования последних двадцати лет по рассматриваемой теме можно отсчитывать с монографии Гиневского и др. [1] по управлению струями и с обзора Рейнольдса и др. [2] по бифуркации и разветвлению струй. В [1, 2] выполнен анализ предыдущих работ, в основном, экспериментальных, рассмотрены методы акустического и вибрационного возбуждения струй и показано, что вибрации сопла струи оказывают аналогичное, хотя и более слабое, влияние на структуру течения. Сделан вывод [1] о том, что низкочастотные гармонические возмущения приводят к интенсификации перемешивания и увеличению шума, а возмущения высокой частоты могут, наоборот, подавлять турбулентность и снижать широкополосный шум струй. В [2] упомянуты работы, где исследовано влияние звука на струи, приводящего к их расщеплению на две и более ветвей, и указан механизм, ответственный за возникновение эффекта расщепления и связанный со взаимодействием вихревых колец, которые генерируются на периферии струи вследствие неустойчивости Кельвина–Гельмгольца.

Расщепление струи на две, три и более ветвей получено также в вычислениях методами DNS (Direct Numerical Simulation) и LES (Large Eddy Simulation) [5-11] после введения комбинации осевых колебаний и покачиваний или закручиваний (спиральных возмущений) профиля скорости на входе. Гармонические возмущения в [6-11] вводились в более узком диапазоне чисел Рейнольдса, $1\,000 \leq Re \leq 20\,000$, чем в лабораторных экспериментах [1-4]. Согласно [5-11], воздействие оказывает заметное влияние в диапазоне $0,2 \leq St \leq 0,8$, где число St включает частоту продольных возмущений f распределения входной скорости. Следует отметить, что в зависимости от St возмущение входного профиля скорости может приводить как к бифуркации струи с ее трансформацией в Y-форму, так и к трифуркации струи с возникновением Ψ-формы, т.е. к её разделению на три ветви, расположенные в одной плоскости. С изменением St меняется также угол расширения струи от 25° до 70° [10]. Угол расширения, дефицит скорости на оси струи и St -диапазон расщепления существенно увеличиваются за счет оптимизации низкоамплитудных спиральных возмущений [11].

Список литературы к разделам 1-2:

1. Гиневский А.С., Власов Б.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. 240 с.
2. Reynolds W.C., Parekh D.E., Juvet P.J.D., Lee M.J.D. Bifurcating and blooming jets // *Annu. Rev. Fluid Mech.* 2003. Vol. 35. P. 295–315.
3. Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко Ю.А. Устойчивость дозвуковых струйных течений и горение: Учеб. пособие. Новосибирск, 2013. 240 с.
4. Грек Г.Р., Козлов В.В., Литвиненко М.В., Литвиненко Ю.А., Шмаков А.Г. Физические механизмы горения микроструй водорода: Моногр. Новосибирск: ИПЦ НГУ, 2020. 374 с.
5. Danaila I., Voersma B.J. Direct numerical simulation of bifurcating jets // *Phys. Fluids.* 2000. Vol. 12, No. 5. P. 1255–1257.
6. Gohil T.B., Saha A.K., Muralidhar K. Simulation of the blooming phenomenon in forced circular jets // *J. Fluid Mech.* 2015. Vol. 783. P. 567–604.
7. Tyliczszak A., Geurts B.J. Parametric analysis of excited round jets — numerical study // *Flow Turbul. Combust.* 2014. Vol. 93. P. 221–247.

8. Tyliszczak A. Multi-armed jets: a subset of the blooming jets // *Phys. Fluids*. 2015. Vol. 27. P. 041703-1–041703-7.
9. Tyliszczak A. Parametric study of multi-armed jets // *Int. J. Heat Fluid Flow*. 2018. Vol. 73. P. 82–100.
10. Gohil T.B., Saha A.K. Numerical simulation of forced circular jets: effect of flapping perturbation // *Phys. Fluids*. 2019. Vol. 31. P. 083602-1–083602-20.
11. Shaabani-Ardali L., Sipp D., Lesshafft L. Optimal triggering of jet bifurcation: an example of optimal forcing applied to a time-periodic base flow // *J. Fluid Mech*. 2020. Vol. 885. P. A34-1–A34-37.

3. Описание работы и используемые алгоритмы

Для изучения структуры струйных течений получены решения точных и отфильтрованных уравнений Навье–Стокса с помощью методов прямого численного моделирования (DNS) и моделирования крупных вихрей (LES). Использован пакет OpenFOAM с различными решателями (icoFoam для несжимаемых струй, rhoPimpleFoam для сжимаемых струй с переносом скаляра, reactingFoam для смеси газов с горением). Вычисления производились до тех пор, пока распределения скорости, осредненные по большим интервалам времени (с момента установления квазистационарного режима, после начального периода развития) перестают изменяться с дальнейшим ростом времени. Проверена сходимость к решению, независимому от сетки и положения границ, с помощью оригинальных критериев сравнения данных для пар расчетов на последовательных сетках. Обработка результатов моделирования выполнена с помощью графических средств для изолиний пассивного скаляра (испускаемого из отверстия вещества), компонент вектора скорости, Q -критерия, λ_2 -критерия, интегральных характеристик, в частности, характерных толщин струи, угла расширения, осредненных по времени величин скорости и скаляра на оси струи. Изучена зависимость характеристик течения от геометрических и физических параметров, в частности, граничных условий, чисел Рейнольдса и Струхала, амплитуды искусственно налагаемых случайных и когерентных возмущений, положения, типа источников возмущений, вводимых для управления струйным течением. Достоверность полученных новых результатов расчетов подтверждена при проверке сходимости к решению, независимому от сетки и положения границ, для различных параметров задачи, а также при качественном и количественном сравнении результатов моделирования с имеющимися в литературе данными численных и физических экспериментов.

4. Полученные результаты:

Развиты вычислительные технологии для изучения тонкой структуры струйных течений при различных условиях, проведена серия численных экспериментов, получены уникальные данные по вихревой структуре, развитию неустойчивости и турбулентности в круглых, плоских и прямоугольных струях. Выполнена детальная проверка точности полученных данных – влияния шагов по пространству и времени, интервала времени осреднения, размера области, граничных условий, численных схем. Изучено влияние входного профиля скорости, вязкости (числа Рейнольдса), перепада плотностей окружающей среды и вещества, истекающего из входных отверстий различной конфигурации (прямоугольное, круглое). Исследованы возможности управления потоком при наложении возмущений различной амплитуды и частоты (числа Струхала) на поле скорости. Построены подробные карты режимов в терминах зависимости угла бифуркации струи с поперечным возмущением от его амплитуды, чисел Рейнольдса и Струхала, включающие результаты реализации проекта и имеющиеся в литературе данные численных и физических экспериментов. На основе полученных результатов разработаны цифровые модели управления струйными течениями, взаимодополняющие лабораторный эксперимент по изучению структуры течения.

Расчетная сетка показана на рис. 1. Некоторые результаты численного моделирования приведены на рис. 2-5 (для комбинации продольных и спиральных гармонических колебаний профиля скорости на входе с частотами f и $2f$, соответственно) и на рис. 6-7 (для поперечных вибраций входного сечения с частотой f_v).

Ключевые результаты, выводы работы и их новизна состоят в следующем:

- При моделировании методами DNS/LES струи, вытекающей со скоростью U из отверстия диаметром D , рассмотрены активные методы управления – наложение осевых и спиральных гармонических колебаний на входной профиль скорости, вибрации сопла, их комбинации.
- Установлено, что вибрационное возбуждение струи приводит к ее бифуркации при числах Рейнольдса $Re (= UD/\nu) > 50$ в широких диапазонах частот и амплитуд, что соответствует эффектам расщепления струи в экспериментах других авторов с акустическим воздействием.
- DNS-моделирование вибрационного и комбинированного возбуждения струйного течения, приводящего к его расщеплению на две и более ветвей, выполнено впервые – результаты реализации проекта не имеют мирового аналога.
- Изучены механизмы взаимодействия вихревых структур при бифуркации струи; сделаны оценки характерной ширины струи и угла расширения течения в плоскости бифуркации, демонстрирующего увеличение с ростом числа Рейнольдса.
- Расчеты при $50 \leq Re \leq 23000$ показали, что для получения эффектов расщепления струи, увеличения угла расширения струи и усиления интенсивности перемешивания необходима оптимизация параметров воздействия, в частности, типа, частоты и амплитуды возмущений.
- Показано, что поперечные механические колебания сопла являются более эффективным способом управления течением, чем спиральное возмущение входного профиля скорости, и даже при небольшом числе $Re \approx 250$ достаточно амплитуды $Z \sim 0,1D$ для бифуркации струи.
- Впервые найдены оптимальные числа Струхалея, соответствующие максимальным углам бифуркации струи с вибрационным возбуждением, что позволило построить карту этих чисел и выявить эффект их падения с уменьшением числа Рейнольдса в интервале $Re < 3000$.
- Получено, что угол расширения струи возрастает с повышением амплитуды возбуждения и показывает насыщение после некоторых пороговых значений амплитуды, а при снижении Re увеличивается пороговая амплитуда и падают значения угла расширения.
- LES-моделирование полей течения и пассивного скаляра (температуры, концентрации) в импактной круглой струе при $Re = 23\ 000$ показывает ее расщепление на несколько ветвей с интенсификацией перемешивания и теплообмена под действием вибраций сопла.

Результаты найдут применение для управления истечением топлива из сопел различного типа с целью повышения устойчивости пламени и снижения вредных выбросов, а также для снижения шума самолета (автомобиля) путем воздействия на выхлопные струи, охлаждения и вентиляции в микроэлектронике, разработки актюаторов, синтетических струй, влияющих на поток для уменьшения сопротивления летательных аппаратов и экономии топлива.

5. Иллюстрации, визуализация результатов.

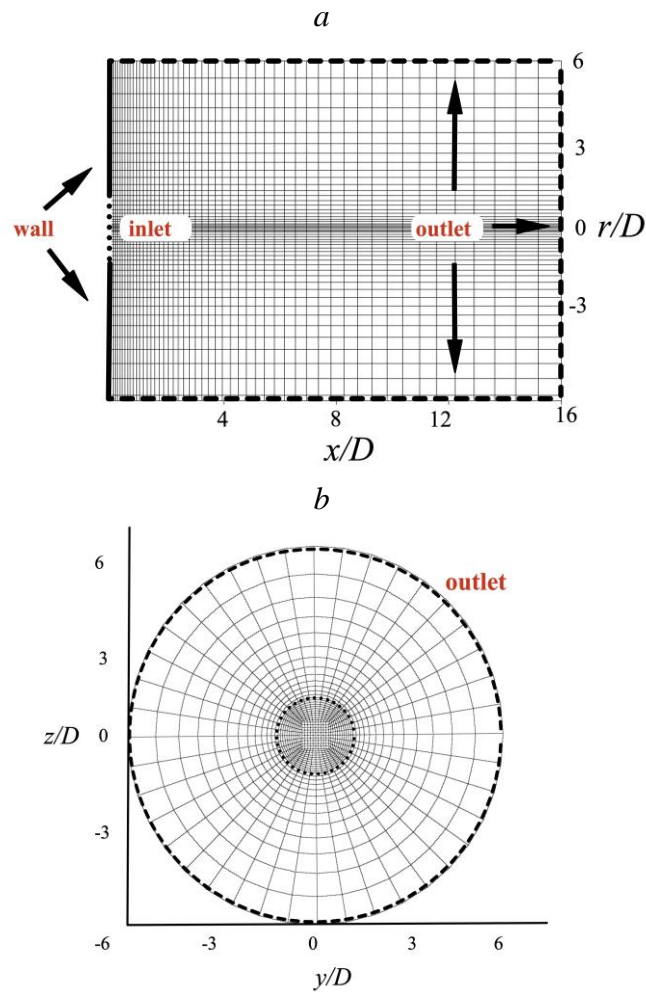


Рис. 1. Схема расчетной области: (а) сечения $y = 0$ или $z = 0$, (б) сечение $x = 0$ (ячейки сетки показаны схематично, в укрупненном виде).

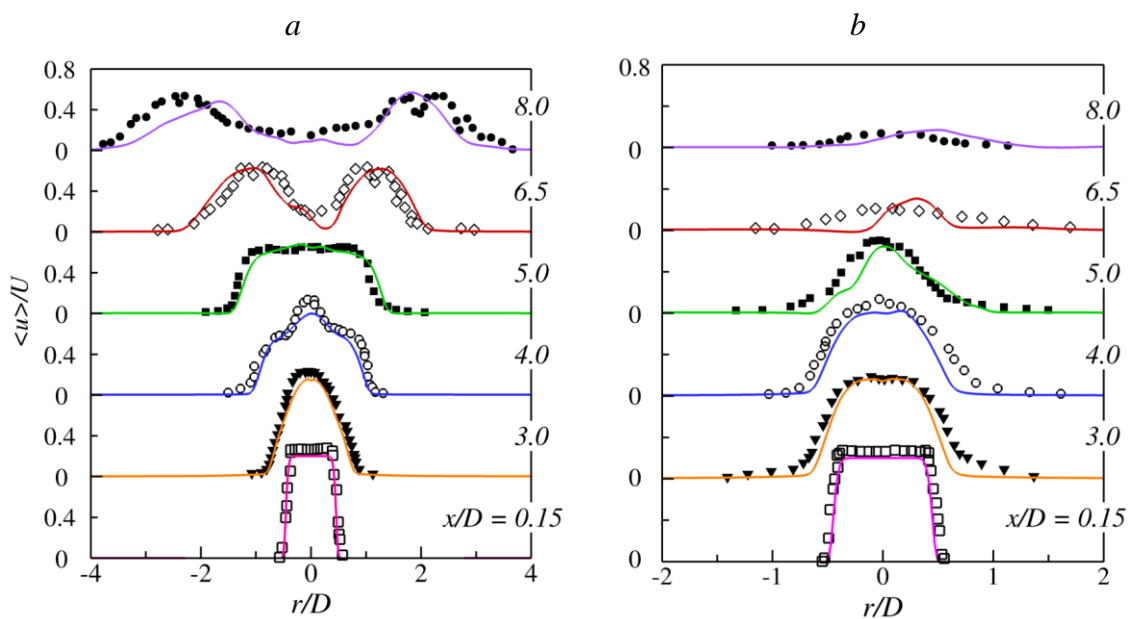


Рис. 2. Профили средней скорости (линии) в плоскости $y = 0$ (а), $z = 0$ (б) при $Re = 3000$ в сравнении с данными [1] при $Re = 4300$ (символы), $x/D = 0,15; 3; 4; 5; 6,5; 8$ для $St = 0,45$.

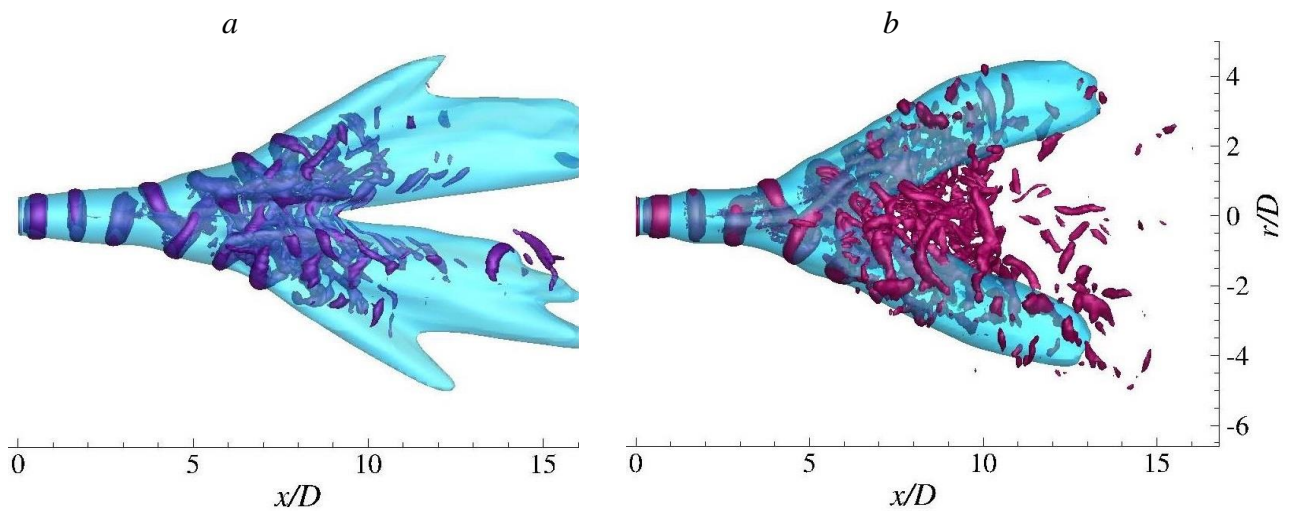


Рис. 3. Изоповерхности Q -критерия, $Q = 0,1(U/D)^2$, и осредненной по времени концентрации пассивного скаляра $\langle c \rangle = 0,2$ при $Re = 1000$ (a), 3000 (b) и $St = 0,45$.

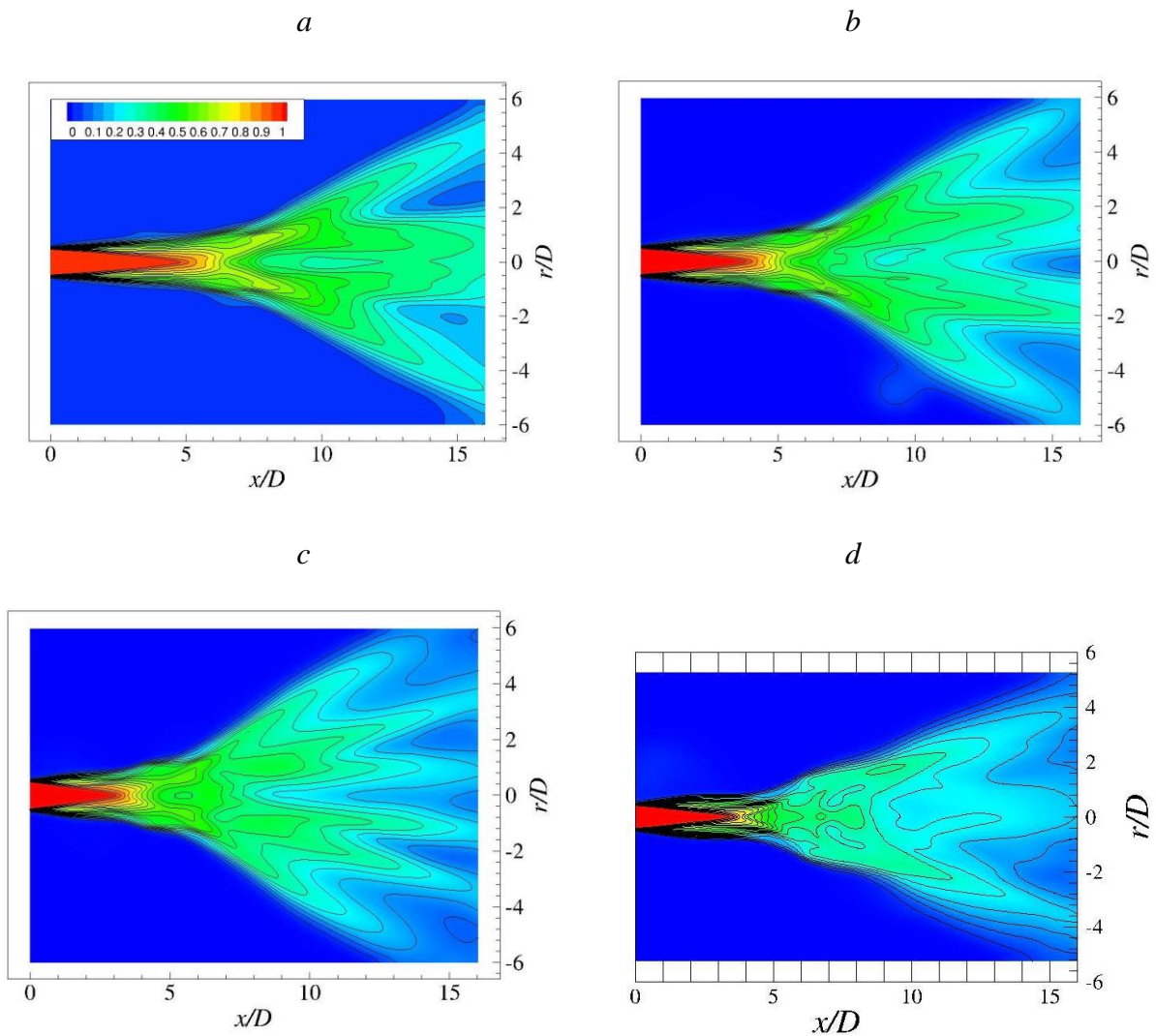


Рис. 4. Осредненная по времени концентрация пассивного скаляра (на входе в струю $c = 1$) для различных амплитуд комбинации продольных и спиральных возмущений профиля скорости $A/U = 0,025$ (a), $0,050$ (b), $0,10$ (c), $0,20$ (d) при $Re = 750$ и $St = 0,45$.

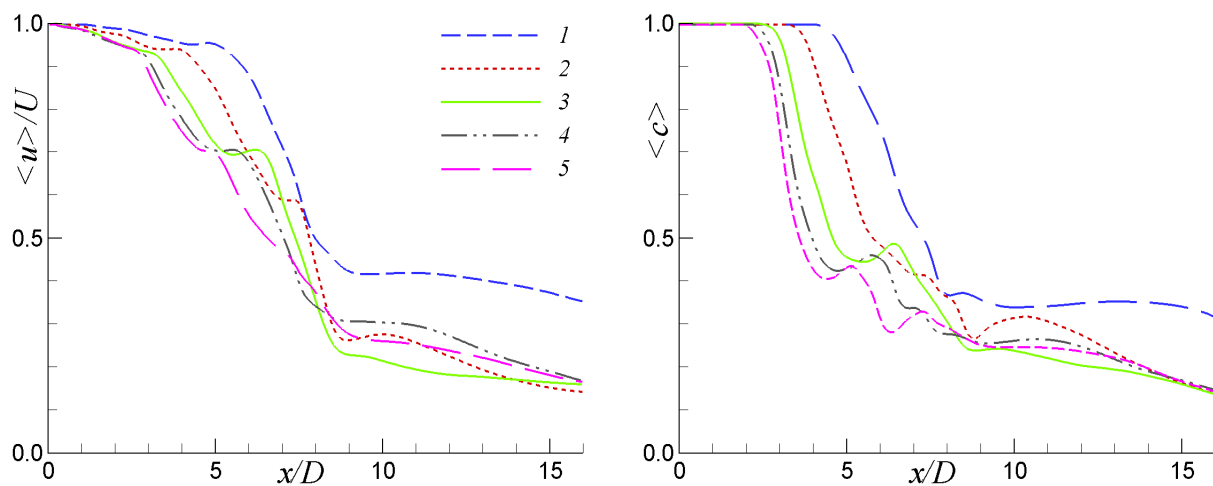


Рис. 5. Значения скорости $\langle u \rangle/U$ и скаляра $\langle c \rangle$ вдоль оси струи при различных амплитудах воздействия $A/U = 0,025$ (1), $0,050$ (2), $0,10$ (3), $0,15$ (4), $0,20$ (5) для $Re = 750$ и $St = 0,45$.

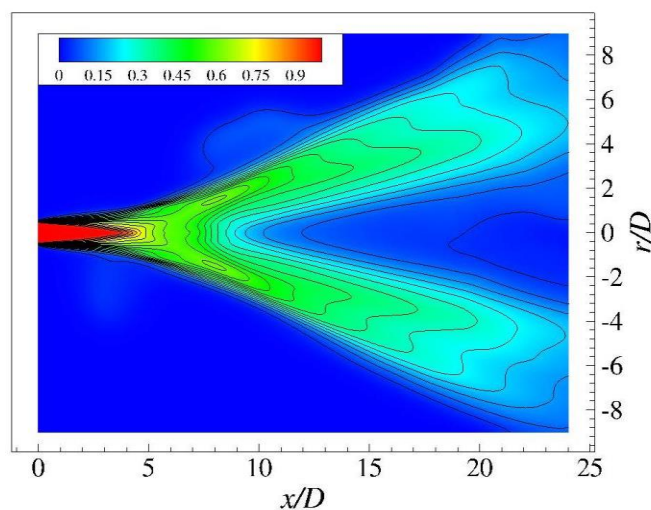


Рис. 6. Изолинии скаляра $\langle c \rangle$ в плоскости бифуркации струи при $Re = 500$ и $St_v = f_v D/U = 0,2$, амплитуда вибраций сопла $Z_0/D = 0,05$.

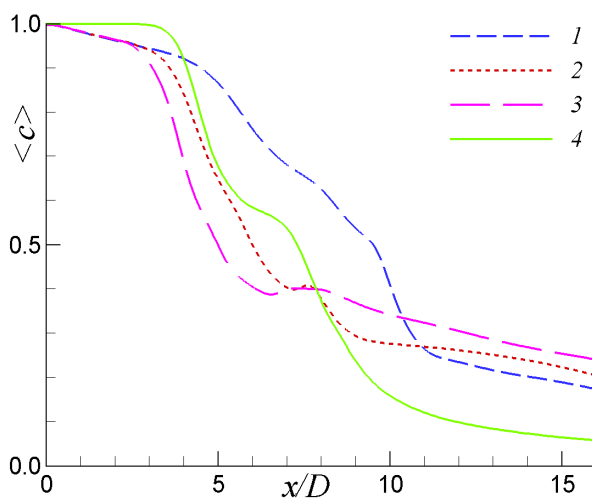


Рис. 7. Изменения $\langle c \rangle$ вдоль оси струи с комбинацией осевых и спиральных возмущений, $St/2 = St_h = 0,2$, $A/U = 0,05$ (1), $0,10$ (2), $0,15$ (3); с вибрацией сопла, $St_v = 0,2$, $Z_0/D = 0,05$ (4).

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Вычислительные ресурсы ИВЦ позволили выполнить высокопроизводительные расчеты (на мелких сетках с сотнями миллионов ячеек) при решении трехмерных нестационарных уравнений движения и воспроизвести поля скорости и давления при различных числах Рейнольдса, Струхала для струйных течений с внешним воздействием на входной границе.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы.

1. Shevchenko A.K., Yakovenko S.N. Numerical study of flow control methods and splitting effects in a round submerged jet // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2021. Vol. 28, Issue 3. P. 353-368.
doi: <https://doi.org/10.1134/S0869864321030069>
Импакт-фактор журнала JCR 2021 = 0.824
2. Shevchenko A.K., Yakovenko S.N. Development of flow control methods in free and impinging jets // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2021. Vol. 2119. P. 012003-1 – 012003-4.
doi: [10.1088/1742-6596/2119/1/012003](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2119/1/012003)
3. Shevchenko A.K., Yakovenko S.N. Active ways of flow and mass-transfer control in round jets with and without impingement // *AIP Conf. Proc.* 2023. Vol. 2504. P. 030050-1 – 012003-6.