

Аннотация работы:

Решены трехмерные нестационарные уравнения Навье–Стокса с помощью методов прямого численного моделирования для изучения структуры струйных течений. Разработаны новые вычислительные алгоритмы управления течением при различных условиях, и получены новые результаты численного моделирования свободных и импульсных струй. Проверено влияние параметров расчета на точность получаемых данных. Изучены возможности управления потоком при наложении возмущений различной амплитуды и частоты (осевых колебаний и винтовых возмущений, поперечных вибраций входного сечения, поперечных колебаний от одного или двух источников на боковых границах, их комбинаций) на поле скорости струи, вытекающей со скоростью U из отверстия диаметром D . Исследованы эффекты изменения размеров области, вязкости и перепада плотности текучей среды.

Тема работы:

Моделирование струйных течений и управление потоком

Состав коллектива:

Яковенко Сергей Николаевич (руководитель), д.ф.-м.н., доцент, в.н.с. ИТПМ СО РАН (основное место работы), профессор кафедры аэрофизики и газовой динамики ФФ НГУ.
Ванькова Ольга Сергеевна, к.ф.-м.н., м.н.с. ИТПМ СО РАН.
Яковенко Елена Эдуардовна, ведущий программист ИТПМ СО РАН
Демиденко Наталья Валентиновна, аспирант ИТПМ СО РАН первого года обучения (магистрант ММФ НГУ до августа 2024 года), инженер-исследователь ИТПМ СО РАН.

Информация о грантах:

1. Проект РФФИ 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 последнее время возрастает интерес к струйным течениям, а также развитию способов управления потоком и тепломассообменом в них. Введение акустических или механических воздействий приводит к появлению и трансформации вихревых структур, способствующих интенсификации перемешивания окислителя с топливом, уменьшению температуры, шума от выхлопных струй двигателей, сопротивления транспортных средств, эмиссии вредных выбросов и расхода топлива. Управление течением и тепломассообменом используют также для повышения эффективности вентиляции и охлаждения турбин, в микроэлектронике, химической промышленности и других отраслях.

Работа нацелена на изучение вихревой структуры и развития неустойчивости в свободной и импульсной струях, возможностей управления потоком и тепломассообменом при наложении возмущений частотой f , разработку алгоритмов управления течениями, взаимодополняющих лабораторные эксперименты. Известные из литературы примеры управления струями относятся к определенным способам воздействия и небольшим диапазонам чисел Рейнольдса $Re = UD/\nu$, Струхала $St = fD/U$. Новизна работы заключается в расширении этих диапазонов, выяснении влияния амплитуды возмущений, типа источников возмущений.

2. Современное состояние проблемы.

В последние четверть века в ряде физических экспериментов по задаче управления струями с наложением акустического или вибрационного возбуждения показано, что гармонические возмущения низкой частоты приводят к интенсификации перемешивания и увеличению шума, а возмущения высокой частоты, наоборот, подавляют турбулентность и снижают широкополосный шум струй. При исследовании влияния внешнего воздействия на струю, приводящего к ее расщеплению на две и более ветвей, предложен и подтвержден механизм, ответственный за возникновение расщепления и связанный со взаимодействием вихревых колец, генерируемых на периферии струи из-за неустойчивости Кельвина–Гельмгольца. Расщепление струи на две и более ветвей получено также в вычислениях методами прямого моделирования (DNS) и крупных вихрей (LES) после наложения комбинации осевых колебаний и покачиваний или закручиваний профиля скорости на входе. Гармонические возмущения в расчетах вводились в более узком диапазоне чисел Рейнольдса, чем в лабораторных экспериментах. Согласно результатам вычислений, воздействие оказывает заметное влияние в диапазоне $0,2 \leq St \leq 0,8$ при $1\ 000 \leq Re \leq 20\ 000$, где число St включает частоту продольных возмущений f распределения входной скорости, а угол расширения, дефицит скорости на оси струи и диапазон чисел St для получения расщепления заметно увеличиваются при оптимизации низкоамплитудных комбинированных возмущений.

3. Описание работы и используемые алгоритмы.

Получены решения трехмерных уравнений Навье–Стокса с помощью DNS-метода, где модели турбулентности не вводятся, при использовании открытого пакета OpenFOAM с различными решателями. Расчеты производились до тех пор, пока распределения скорости и температуры, 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. Обработка результатов моделирования выполнена с помощью графических средств для изолиний компонент вектора мгновенной и осредненной скорости, характерных толщин струи, угла расширения, величин скорости и скаляра на оси струи, числа Нуссельта на поверхности, на которую натекает неизотермическая импактная струя. Изучена зависимость характеристик течения от геометрических и физических параметров, в частности, граничных условий, чисел Рейнольдса и Струхала, амплитуды искусственно налагаемых 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 сравнении результатов моделирования с имеющимися данными численных и физических экспериментов.

4. Полученные результаты.

Усовершенствованы численные алгоритмы для изучения структуры струйных течений при различных условиях искусственно наложенных возмущений и получены новые результаты вычислительных экспериментов. Уточнена численная реализация ряда способов управления потоком и тепломассообменом в свободной и импактной струях: продольные, винтовые, крутильные и поперечные гармонические возмущения профиля скорости во входном сечении амплитудой A , поперечные колебания входного сечения амплитудой Z (рис. 1), поперечные возмущения от одного и нескольких источников на боковых границах (аналог звуковых динамиков, механических актюаторов, синтетических струй), пассивные методы управления (введение решеток простой и фрактальной формы во входном сечении) (рис. 2).

В ходе верификации алгоритмов проверена точность получаемых данных и исследовано влияние параметров численной реализации – шагов по координатам и времени, моментов начала и конца осреднения полей скорости, размеров расчетной области – и выполнена валидация при сравнении с данными измерений (Reynolds et al., 2003). Некоторые результаты верификации и валидации для свободной струи с бифуркацией при наложении возмущений (рис. 2) показаны на рис. 3-4. Получено, что на сетках с минимальным размером ячеек $h_{\min} = \Delta x = \Delta y = \Delta z < 0,025D$ у входа в струю, при их растяжении в направлениях x, y, z по геометрическим прогрессиям с отношением размеров соседних ячеек $q_x \approx q_y \approx q_z \approx 1,01$ в области $12D \times 9D \times 9D$ для шага по времени, определяемого из условия максимального числа Куранта $Co_{\max} = 0,5$, полученные данные показывают незначительные различия при дальнейшем измельчении ячеек, шага по времени, увеличении области (при этом сильно возрастают требования к вычислительным ресурсам, а также к моментам начала и конца осреднения). Поэтому близкие к указанным сетки и $Co_{\max} \sim 0,5$ выбраны далее в расчетах при различных параметрах для разных способов задания возмущений во входном сечении.

В расчетах на мелкой сетке уточнено поведение струи с вибрациями на входе в зависимости от числа St и амплитуды колебаний при фиксированном $Re = 500$ (рис. 5-7), а также изучено влияние различных методов активного управления струйным течением, и оценен угол расщепления (бифуркации) по кривым нарастания характерной ширины $d = 0,5(d_1 + d_2)$, где $d_1 = |z(\langle u \rangle = \langle u \rangle_{1\max})|$, $d_2 = |z(\langle u \rangle = \langle u \rangle_{2\max})|$. Выполнены численные эксперименты по оптимизации параметров активного управления на струйные течения, по результатам которых получены диапазоны оптимальных чисел Струхала и амплитуды возмущения для чисел Рейнольдса в диапазоне от 100 до 1000.

Изучено влияние управляющих параметров на теплообмен и выполнена их оптимизация для случая неизоэнтальной импактной струи, в которой интенсификация переноса импульса и тепла обусловлена введением решеток различной конфигурации во входном сечении струи (рис. 2). Проведены численные исследования при различных геометрических параметрах конфигураций решеток простой (SG2) и фрактальной (SFG) формы для чисел Рейнольдса от 250 до 38 500 (рис. 8-9), и получена сильная интенсификация теплопереноса при введении решетки SG2 и, особенно, SFG, в согласии с данными опытов.

Полученные результаты будут востребованы при управлении истечением топлива из сопел различного типа для повышения устойчивости пламени и снижения вредных выбросов, в задачах снижения шума двигателей путем воздействия на выхлопные струи, охлаждения и вентиляции в электронике, разработки актюаторов, синтетических струй, влияющих на поток для снижения сопротивления летательных аппаратов и экономии топлива.

5. Иллюстрации, визуализация результатов.

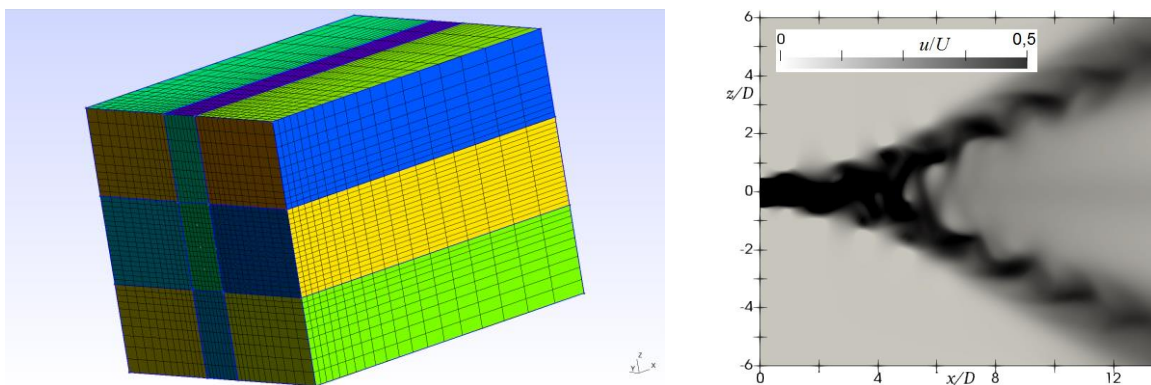


Рис. 1. Схема области расчета (слева); скорость $u(x, z, y = 0)$ с комбинацией вибраций сопла и продольного возмущения при $Re = 500$, $St = 0,2$, $Z = 0,04D$, $A = 0,17U$, $t = 196D/U$ (справа).

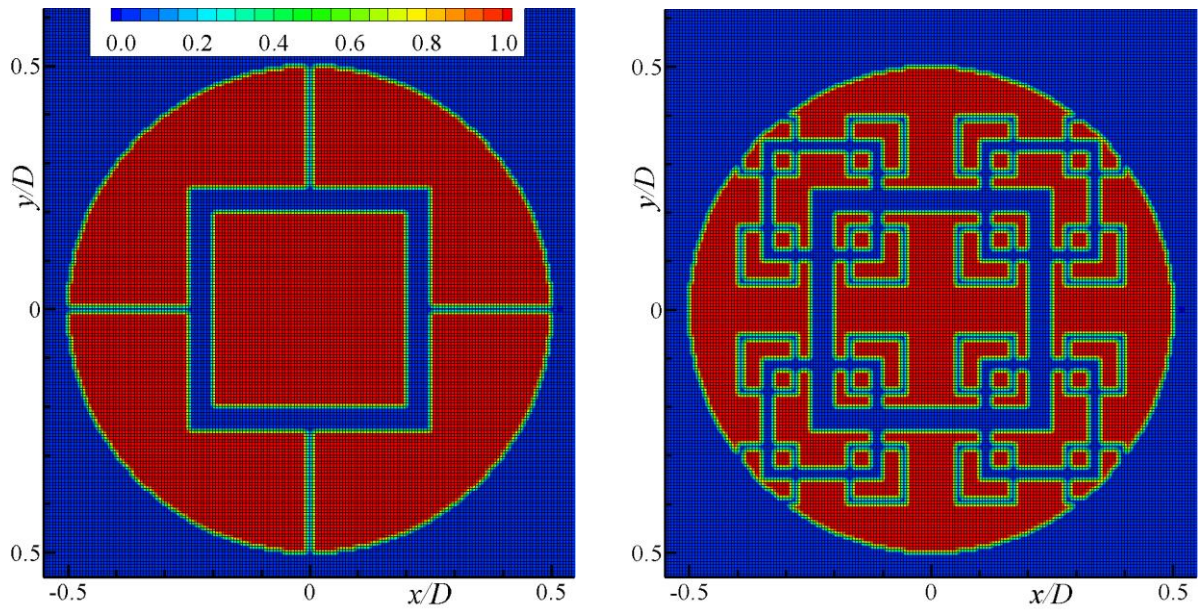


Рис. 2. Схема течения в импактной струе на входной границе ($z = 0$) в окрестности сопла – изолинии скорости $w(x, y)$ (показаны цветом), квадратные ячейки сетки (черные линии), элементы решетки на входе для конфигураций SG2 (слева), SFG (справа) из эксперимента.

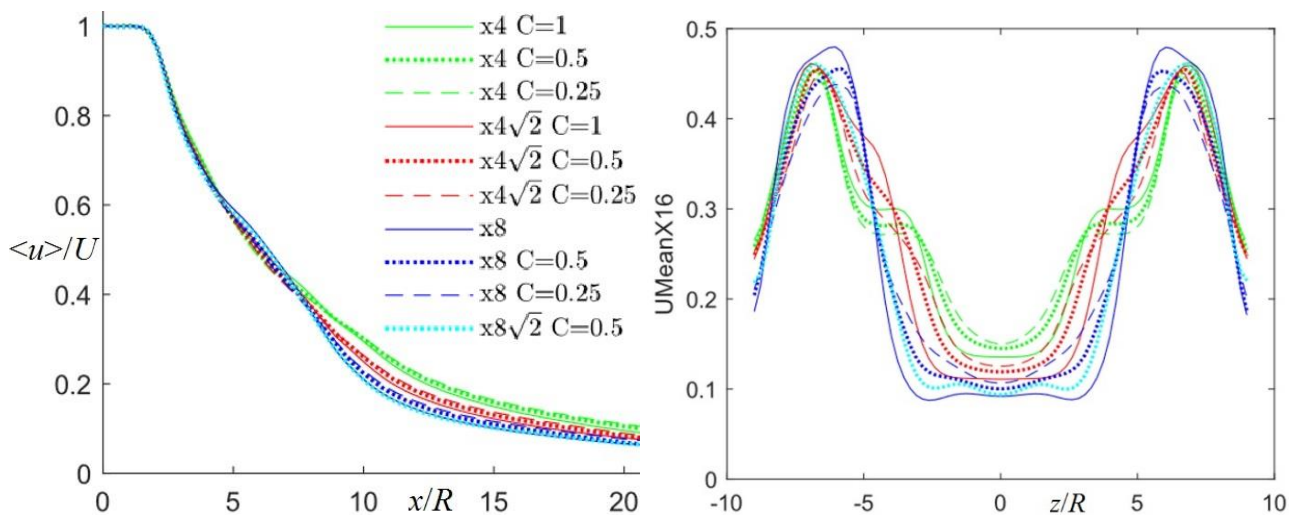


Рис. 3. Результаты на сетках $x4$, $x4\sqrt{2}$, $x8$, $x8\sqrt{2}$ при $Z = 0,25D$, $Re = 500$, $St = 0,15$: скорость $\langle u \rangle / U$ на оси $y = z = 0$ и в поперечном сечении $x/R = 16$, осредненная при $t_0 \leq t \leq t_0 + T$, где $t_0 = T = 100D/U$, шаг по времени ограничен максимальным числом Куранта $C = 0,25, 0,50, 1,00$.

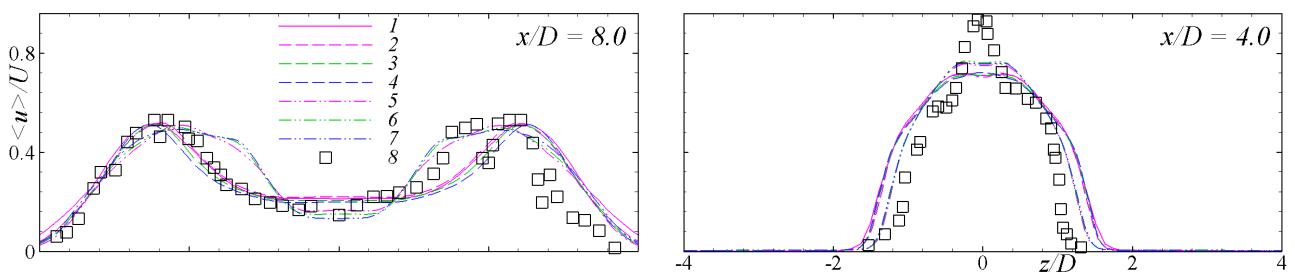


Рис. 4. Профили $\langle u \rangle$ для $Re = 500$, $St = 0,2$, $Z = 0,04D$ при $y = 0$, $x/D = 4$ и 8 : расчеты на сетке 1F (1), 3 (2, 5), 4 (3, 6), 5 (4, 7) при $A = 0,17U$ (1–4) и $A = 0$ (5–7); опыты (Reynolds et al., 2003) при $Re = 4300$, $0,2 \leq St \leq 0,3$, $A = 0,17U$, для амплитуды орбитального возмущения $0,04D$ (8).

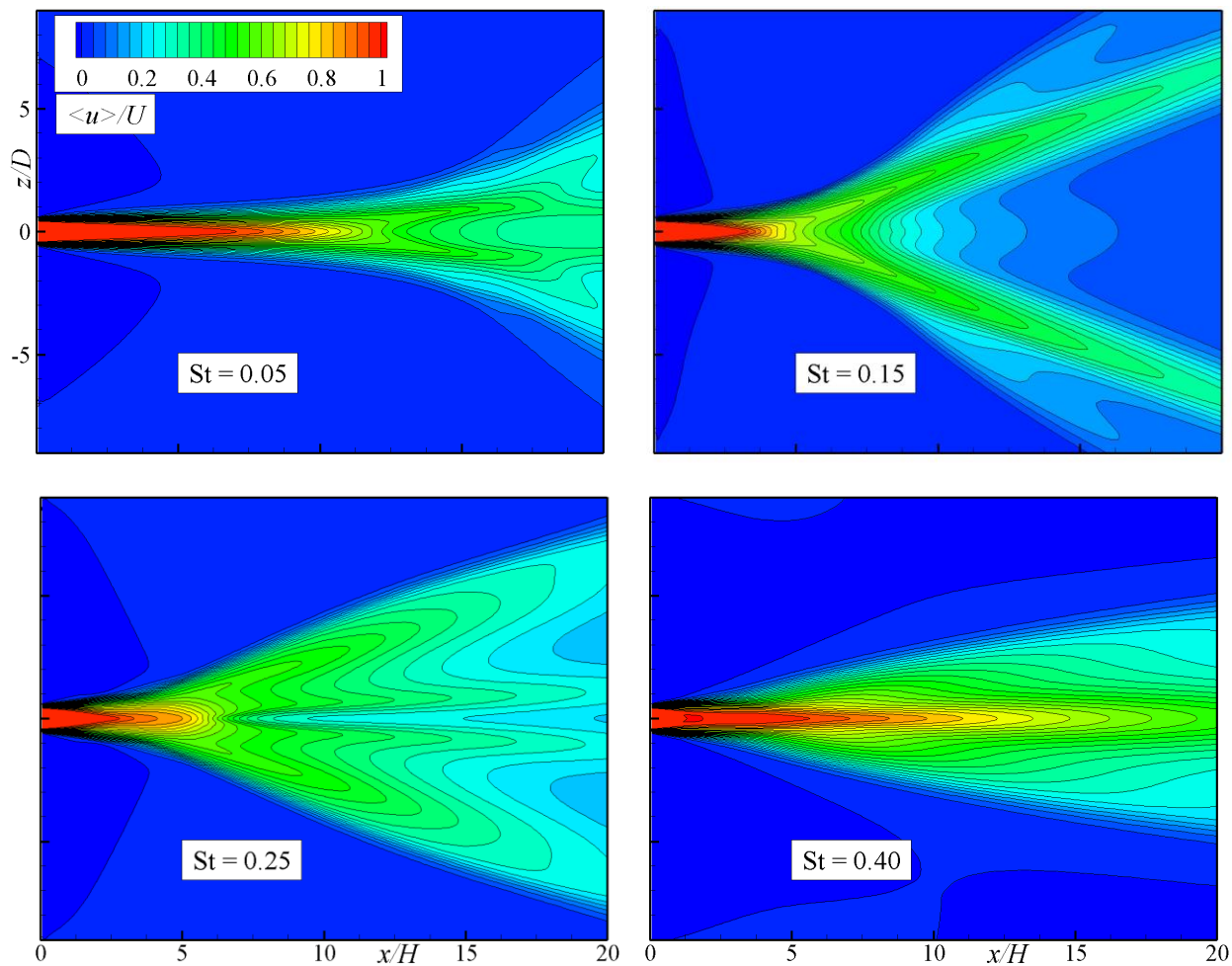


Рис. 5. Результаты при $y = 0$ и $Re = 500$, $Z/D = 0,05$, полученные на мелкой сетке 1F: изолинии $\langle u \rangle/U$ для $St = 0,05, 0,10, 0,15, 0,20, 0,25, 0,40$.

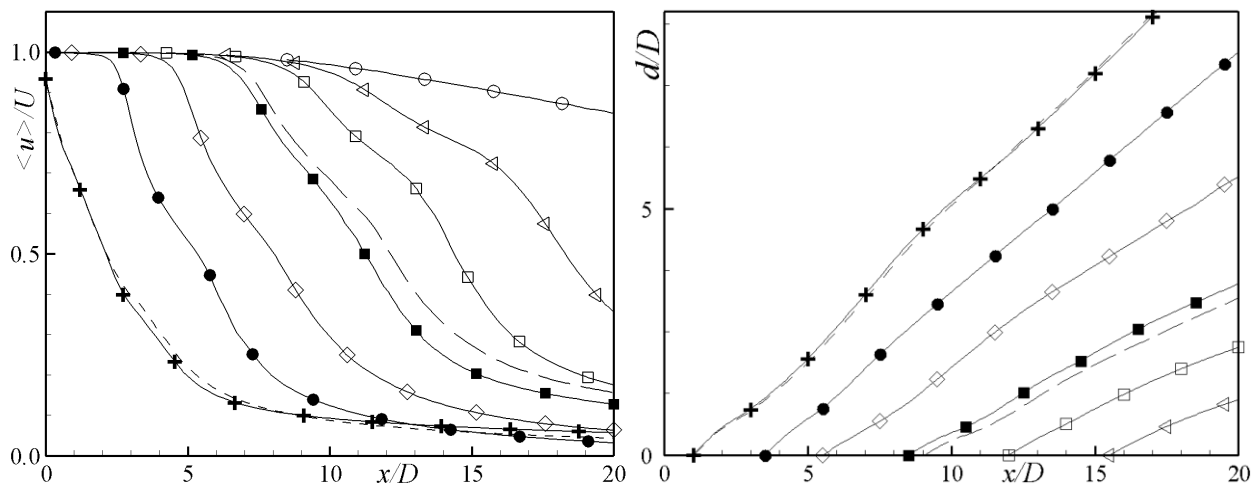


Рис. 6. Значения $\langle u \rangle$, d вдоль оси при $Re = 500$, $St = 0,15$ на мелкой сетке 1F (1–7) и средней сетке 1 (8, 9) при $Z/D = 0$ (1), 0,0025 (2), 0,005 (3), 0,010 (4, 8), 0,025 (5), 0,1 (6), 0,5 (7, 9).

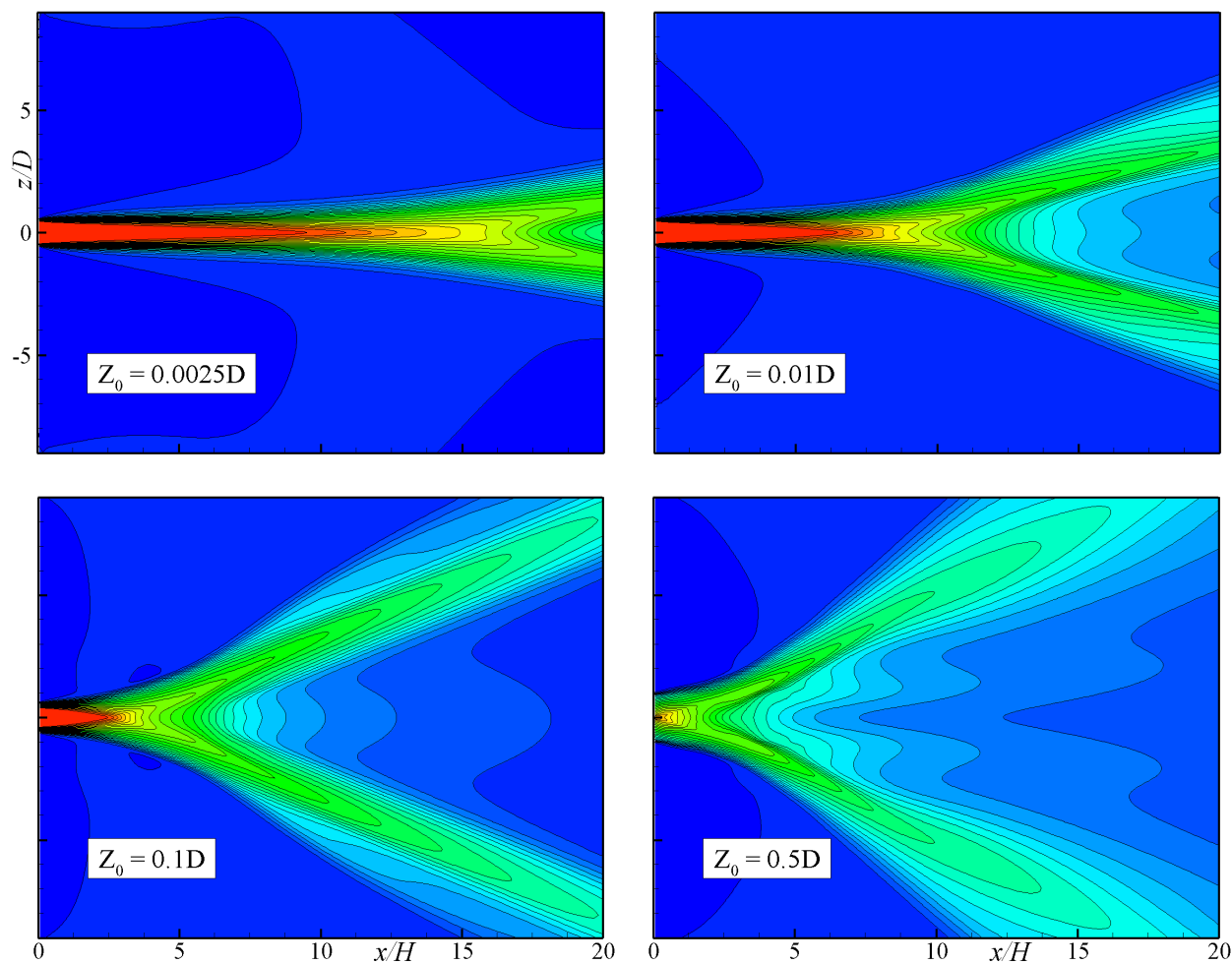


Рис. 7. Изолинии $\langle u \rangle/U$ при $Re = 500$, $St = 0,15$ и $Z/D = 0,0025, 0,005, 0,01, 0,025, 0,1, 0,5$.

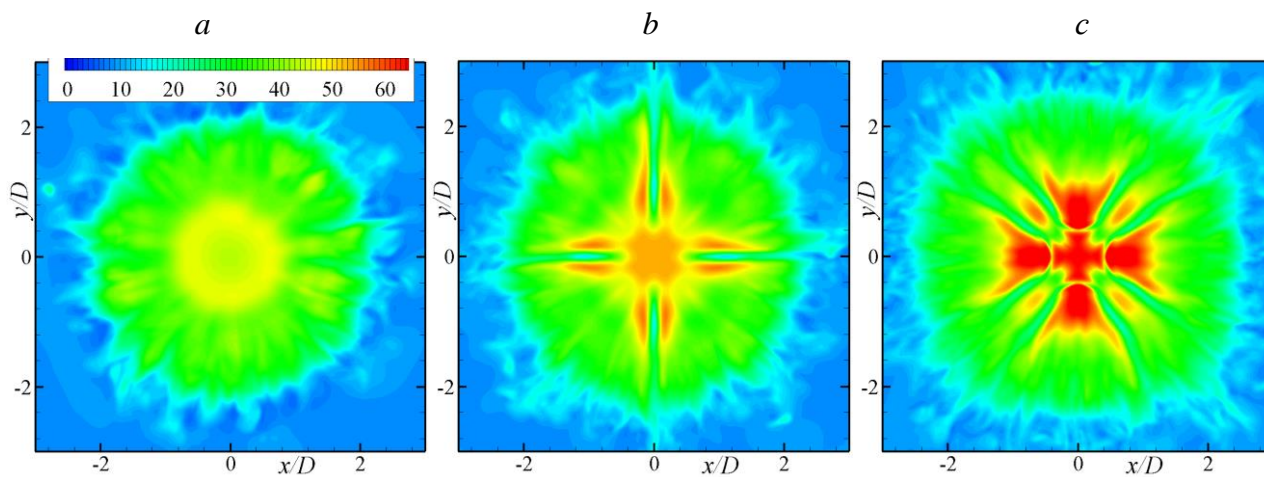


Рис. 8. Изолинии числа Нуссельта $Nu(x, y)$ на стенке, на которую натекает импактная струя при $Re = 5000$: без решетки, вариант JWT (a); с решеткой, варианты SG2 (b), SFG (c).

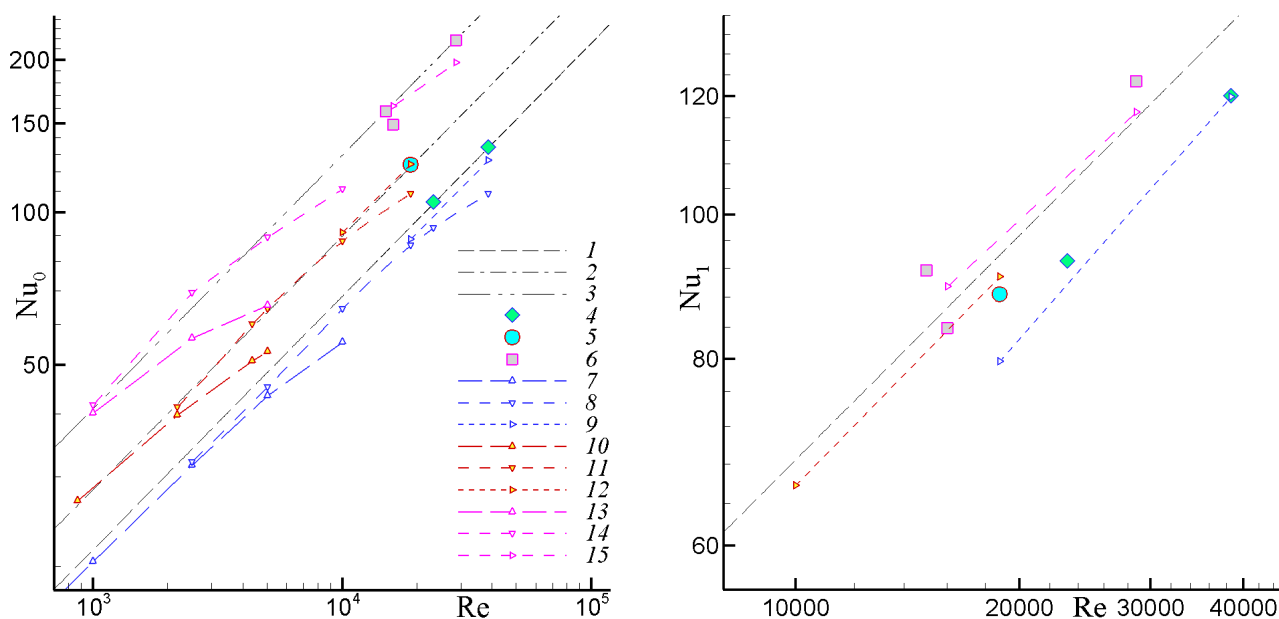


Рис. 9. Зависимости числа Нуссельта на оси $Nu_0(Re)$, осредненного ($r \leq 3D$) числа Нуссельта $Nu_1(Re)$: степенные функции $0.685Re^{1/2}$ (1), $0.9Re^{1/2}$ (2), $1.3Re^{1/2}$ (3), аппроксимирующие результаты измерений для JWT (4), SG2 (5), SFG (6); настоящие расчеты на сетках 1 (7, 10, 13), 2 (8, 11, 14), 3 (9, 12, 15) для JWT (7, 8, 9), SG2 (10, 11, 12), SFG (13, 14, 15).

Эффект от использования кластера в достижении целей работы.

Вычислительные ресурсы ИВЦ позволили выполнить высокопроизводительные расчеты (после перехода от грубых сеток в расчетах на персональных компьютерах к мелким сеткам с сотнями миллионов ячеек) при решении трехмерных нестационарных уравнений движения и воспроизвести поля скорости и температуры при различных числах Рейнольдса, Струхала для струй с комбинированным внешним воздействием на входной и боковых границах.

Перечень публикаций, содержащих результаты работы.

1. Vankova O.S., Yakovenko S.N. Numerical study of jet flow control using acoustic perturbations // Eurasian Journal of Mathematical and Computer Applications. 2024. Vol. 12, Is. 4. P. 140 – 149. doi: <https://doi.org/10.32523/2306-6172-2024-12-4-140-149>
Импакт-фактор журнала JIF 2023 = 0.6 (WoS Q4), SJR 2023 = 0.33 (Scopus Q3)

2. Яковенко С.Н. Управление теплопереносом в импактной струе с решеткой на входе // Известия вузов. Физика. 2024. Т. 67, № 12. С. 109–116. doi: [10.17223/00213411/67/12/14](https://doi.org/10.17223/00213411/67/12/14)

3. Yakovenko S.N., Demidenko N.V., Vankova O.S. Active ways to control jet flows // E3S Web of Conferences. 2024. Vol. 592. 02018. P. 1 – 8. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202459202018>
Импакт-фактор журнала SJR 2023 = 0.18

4. Vankova O.S., Yakovenko S.N. Numerical simulations of a subsonic round jet with transverse acoustic and mechanical forcing // E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 459. 03002. P. 1 – 6. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202345903002>
Импакт-фактор журнала SJR 2023 = 0.18