

ОТЧЕТ О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ ИВЦ НГУ

1. Аннотация

Работа посвящена исследованию эффектов закрутки в турбулентных свободных и импактных струях. Исследование проводилось с помощью численного моделирования с высоким пространственным и временным разрешением по методу крупных вихрей (LES) с передовой моделью подсеточной турбулентности.

Особенностью работы было рассмотрение метода организации закрутки с помощью вращающегося сопла. Такой метод является намного менее изученным, чем применение более распространенных тангенциальных и лопаточных завихрителей. Данный метод позволяет варьировать закрутку в очень широких пределах, при этом, не внося значительной турбулентности во входной поток. Также в данном методе появляется дополнительная степень свободы, оказывающая влияние на течение, связанная с формой вращающегося сопла. Исследование влияния формы вращающегося сопла на структуру потока на данный момент крайне редки.

В работе исследовались две формы вращающегося сопла – прямая труба и сопло Витошинского с поджатием.

В ходе расчетов, было обнаружено, что в случае импактной струи, из вращающегося сопла с поджатием, наблюдается эффект сужения и ускорения струи на ее начальном участке, сопровождавшийся появлением зоны рециркуляции внутри сужающегося участка сопла. Данный эффект также проявлялся в фокусировке среднего теплового потока на импактной поверхности. Данный эффект является необычным, как правило, увеличение закрутки приводит к ускорению расширения струи, что и наблюдалось во второй серии расчетов, для сопла в виде вращающейся прямой трубы.

Рассмотрение баланса импульса показало, что в эффекте фокусировки участвуют спиральные когерентные вихревые структуры, формирующиеся на выходе из сужающегося сопла. В процессе своей эволюции данные вихри уменьшают свой диаметр, что приводит к осевому ускорению струи.

Также, в ходе расчетов для обоих типов сопел было исследовано явление вихревого распада, проявляющегося на больших закрутках, и его влияние на перенос пассивной примеси.

2. Тема работы

Численное исследование турбулентной диффузии в закрученных свободных и импактных струях методом крупных вихрей (LES).

3. Состав коллектива

- Константин Игоревич Борыняк, магистрант ФФ НГУ, лаборант, Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН
- Михаил Юрьевич Хребтов, к.ф.-м.н., с.н.с., Институт теплофизики имени С. С. Кутателадзе СО РАН

4. Информация о гранте

Грант РФФИ №16-19- 10566 «Нестационарный теплообмен в импактных струях с закруткой и горением», руководитель д.ф.-м.н., Владимир Михайлович Дулин

5. Научное содержание работы

5.1. Постановка задачи

Струйные течения, в связи с широким спектром их применимости, в настоящее время представляют большой интерес. Изучение основных характеристик течений и понимание их основных механизмов в дальнейшем могут позволить усовершенствовать ряд технических систем, таких как: реакторы, смесители, камеры сгорания, системы охлаждения и т.п.

Также повышенный интерес к исследованию струйных течений может быть обусловлен многообразием различных конфигураций: свободные струи, натекающие на преграду, плоские струи, струи с различными способами организации закрутки (подача закрученной жидкости, вращение сопла, лопаточные завихрители и т.п.) и др.

Отсюда следует, что повышенный интерес, безусловно, вызывают способы управления потоком в приложении к задачам, связанным со струйными течениями. Одним из способов управления является особая геометрия сопла. Например, для струй, истекающих из сужающихся сопел, как правило, наблюдается формирование тороидальных вихрей в сдвиговом слое в результате неустойчивости Кельвина-Гельмгольца.

5.2. Современное состояние задачи

С ростом доступных вычислительных ресурсов появились также работы, в которых динамика струйных течений, а также формирующиеся в них вихревые структуры изучаются вычислительными методами. В ряде работ [Danaila et al. (1997), Voersma et al. (1998), Freund et al. (2000), Freund (2001), Lardeau et al. (2002), Babu and Mahesh (2004), Picano and Casciola (2007), Gohil et al. (2011)] было проведено прямое численное моделирование (DNS, Direct numerical simulation) уравнений Навье-Стокса. Однако, в виду накладываемых ограничений, связанных с высокими требованиями к производительности, доступные числа Рейнольдса и размеры, исследуемой области ограничены 5000 и $x/d < 50$ соответственно.

Иначе обстоят дела с методом крупных вихрей (LES, Large eddy simulation). Ввиду использования моделей, которые позволяют не разрешать напрямую определенные масштабы, ограничения на числа Рейнольдса являются более мягкими, что позволяет провести расчеты для более широкого диапазона чисел Рейнольдса, превышающие на порядок характерные числа для DNS.

В работах [Bogey et al. (2003), Bogey and Bailly (2005, 2006a, b, c)] проведены расчеты методом крупных вихрей, которые позволили проследить влияние начальных условий и числа Рейнольдса на средние характеристики течения. В [Bogey et al. (2012)] авторы исследовали характеристики турбулентной струи, истекающей из трубы для $Re=105$.

Также стоит отметить работу [Илюшин и Красинский (2006)], в которой основной акцент сделан на сопоставлении результатов PIV-экспериментов с результатами, полученными в LES-моделировании. Также, был проведен анализ влияния величины параметра Смагоринского, а также уровня начальных пульсаций на результаты моделирования. В работе [Hrebtov et al. 2010] была проанализирована динамика крупных вихревых образований и было показано, что процесс парного объединения данных структур связан с наличием обратного потока кинетической энергии турбулентности.

Основной характеристикой закрученных струйных течений является степень закрутки, определяемая соотношением [Ахмедов и др. 1977, Гупта и др. 1987]:

$$S = \frac{2K_{\theta}}{M_x d} = \frac{\omega R}{2V_x} \quad (5.2.1)$$

где определяющими параметрами являются импульс струи Mx (5.2.1) и момент импульса струи K_{θ} [Лойцянский 1953].

$$K_{\theta} = 2\pi \int_0^{\infty} \rho V_x V_{\theta} r^2 dr \quad (5.2.6)$$

$$M_x = 2\pi \int_0^{\infty} (P + \rho V_x^2) r dr \quad (5.2.7)$$

Закрученные струи можно классифицировать тремя типами:

- Слабозакрученные, для которой наблюдается влияние закрутки на угол раскрытия, уровень пульсаций и скорости вовлечения окружающей жидкости в поток ($S < 0.3$)
- Струи с умеренной закруткой, для которых сохранение момента импульса при расширении приводит к торможению продольной компоненты скорости на оси ($0.3 < S < 0.5$).
- Сильнозакрученные, для которых наблюдается возникновение зоны рециркуляции, связанное с влиянием градиента давления ($S > 0.5$).

Упомянутое выше явление для сильно закрученных струй называется распадом вихревого ядра, которому посвящено большое количество исследований, направленные на изучение влияния на распад таких параметров, как, например, профили скорости на входе, величина закрутки.

Также в настоящее время растет интерес к закрученным потокам с горением. Лучшее понимание механизмов, возникающих в ближней области сопла, позволит оптимизировать режимы горения и в дальнейшем получить большую прикладную пользу от подобных исследований.

1. Babu P. C., Mahesh K. Upstream entrainment in numerical simulations of spatially evolving round jets // *Physics of Fluids*. – 2004. – Т. 16. – №. 10. – С. 3699-3705.
2. Boersma B. J., Brethouwer G., Nieuwstadt F. T. M. A numerical investigation on the effect of the inflow conditions on the self-similar region of a round jet // *Physics of fluids*. – 1998. – Т. 10. – №. 4. – С. 899-909.
3. Bogey C., Bailly C. Computation of the self-similarity region of a turbulent round jet using large-eddy simulation // *Direct and Large-Eddy Simulation VI*. – Springer, Dordrecht, 2006a. – С. 285-292.
4. Bogey C., Bailly C. Effects of inflow conditions and forcing on subsonic jet flows and noise // *AIAA journal*. – 2005. – Т. 43. – №. 5. – С. 1000-1007.
5. Bogey C., Bailly C. Large eddy simulations of round free jets using explicit filtering with/without dynamic Smagorinsky model // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. – 2006c. – Т. 27. – №. 4. – С. 603-610.
6. Bogey C., Bailly C. Large eddy simulations of transitional round jets: influence of the Reynolds number on flow development and energy dissipation // *Physics of Fluids*. – 2006b. – Т. 18. – №. 6. – С. 065101.
7. Bogey C., Marsden O., Bailly C. Influence of initial turbulence level on the flow and sound fields of a subsonic jet at a diameter-based Reynolds number of 10 5 // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2012. – Т. 701. – С. 352-385.
8. Freund J. B. Noise sources in a low-Reynolds-number turbulent jet at Mach 0.9 // *Journal of Fluid Mechanics*. – 2001. – Т. 438. – С. 277-305.
9. Gohil T. B., Saha A. K., Muralidhar K. Direct numerical simulation of naturally evolving free circular jet // *Journal of Fluids Engineering*. – 2011. – Т. 133. – №. 11. – С. 111203.
10. Hinze J. O., Zijnen B. G. V. D. H. Transfer of heat and matter in the turbulent mixing zone of an axially symmetrical jet // *Flow, Turbulence and Combustion*. – 1949. – Т. 1. – №. 1. – С. 435.
11. Hrebtov M. Y., Ilyushin B. B., Krasinsky D. V. Inverse energy cascade in a turbulent round jet // *Physical Review E*. – 2010. – Т. 81. – №. 1. – С. 016315.
12. Lardeau S., Lamballais É., Bonnet J. P. Direct numerical simulation of a jet controlled by fluid injection // *Journal of turbulence*. – 2002. – №. 3. – С. N2.
13. Picano F., Casciola C. M. Small-scale isotropy and universality of axisymmetric jets

//Physics of Fluids. – 2007. – Т. 19. – №. 11. – С. 118106.

14. Ахмедов Р. Б., Рашидов Ф. К., Балагула Т. Б. Аэродинамика закрученной струи. – Энергия, 1977.
15. Гупта А., Лилли Д., Сайред Н. Закрученные потоки. М: Мир. 1987
16. Дулин В. М. ТУРБУЛЕНТНАЯ СТРУКТУРА И ДИНАМИКА СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ С ЗАКРУТКОЙ И ГОРЕНИЕМ.
17. Илюшин Б. Б., Красинский Д. В. Моделирование динамики турбулентной круглой струи методом крупных вихрей //Теплофизика и аэромеханика. – 2006. – Т. 13. – №. 1. – С. 49-61
18. Лойцянский Л. Г. Распространение закрученной струи в безграничном пространстве, затопленном той же жидкостью //Прикладная математика и механика. – 1953. – Т. 17. – №. 1. – С. 14-27.

5.3. Подробное описание работы, включая используемые методы.

В качестве основной подсеточной модели для моделирования методом крупных вихрей был выбран подход, подразумевающий вычисление турбулентной энергии на неразрешенных масштабах, предложенный в [Kim, Menon 1995] для того, чтобы учесть локальную структуру течения, а также историю развития турбулентности.

Как было сказано выше, модель основана на эволюционном уравнении на подсеточную кинетическую энергию турбулентности в следующей форме[Yoshizawa 1993]:

$$k_{sgs} = \frac{1}{2}(\overline{u^2} - \bar{u}^2) \quad (5.3.1)$$

$$\frac{\partial k_{sgs}}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_i} = -\tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} - \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_{sgs} \frac{\partial k_{sgs}}{\partial x_i} \right) \quad (5.3.2)$$

Правая часть уравнения (5.3.2) состоит из трёх слагаемых, представляющих, соответственно, производство, диссипацию и передачу энергии. Подсеточные напряжения зависят от подсеточной вязкости следующим образом:

$$\tau_{ij} = -2\nu_{sgs} \bar{S}_{ij} + \frac{2}{3} \delta_{ij} k_{sgs} \quad (5.3.3)$$

где

$$\nu_{sgs} = C_v \sqrt{k_{sgs}} \bar{\Delta} \quad (5.3.4)$$

Как показано в уравнении (5.3.4), имеет вид, который используется в стандартных моделях турбулентности с одним уравнением. Уравнение (5.3.2) оказывается замкнутым при условии применения модели для величины диссипации. По соображениям размерности может быть смоделировано простым образом:

$$\varepsilon = C_\varepsilon \frac{\sqrt{k_{sgs}}}{\bar{\Delta}} \quad (5.3.5)$$

Главным преимуществом данной модели над динамической моделью Смагоринского является отсутствие предположения о локальном равновесии между производством подсеточной энергии и ее диссипацией. Вместо этого было добавлено прямое вычисления баланса энергии.

Также, помимо уравнения переноса импульса, в данной задаче разрешалось уравнение на перенос пассивной примеси, имеющее следующий вид:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{C} \bar{u}_j) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\frac{\nu}{Sc} + \frac{\nu_{sgs}}{Sc_t} \right) \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i} \right) \quad (5.3.6)$$

Число Шмидта Sc и его турбулентный аналог Sct, которое характеризует отношение диффузии импульса, связанного с вязкостью к диффузии примеси был взят равным 0.9.

1. Kim W. W., Menon S. A new dynamic one-equation subgrid-scale model for large eddy simulations //33rd Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. – 1995. – С. 356
2. Yoshizawa A. Bridging between eddy-viscosity-type and second-order models using a two-scale DIA //Proc. of 9th Int. Symp. on Turbulent Shear Flow, Kyoto, Japan, 1993. – 1993. – Т. 3. – С. 1-6

5.4. Полученные результаты

Были проведены расчеты для следующего набора закруток: $S=0; 0.3; 1$, для $Re = 10^4$. По их результатам были получены мгновенные и средние поля скорости и температуры а также распределения теплового потока и напряжений Рейнольдса.

Для верификации результатов было проведено сравнение расчета ($S=0$) с экспериментом для незакрученной импактной струи с соплом аналогичной формы [Dulin, 2016] с близким к расчетному числу Рейнольдса (8900) и таким же расстоянием до импактной поверхности ($l=3D$). Сравнение профилей продольной скорости (рис 5.4.1) показывает хорошее согласие расчетных данных с экспериментом, что говорит о правильном выборе разрешения сетки.

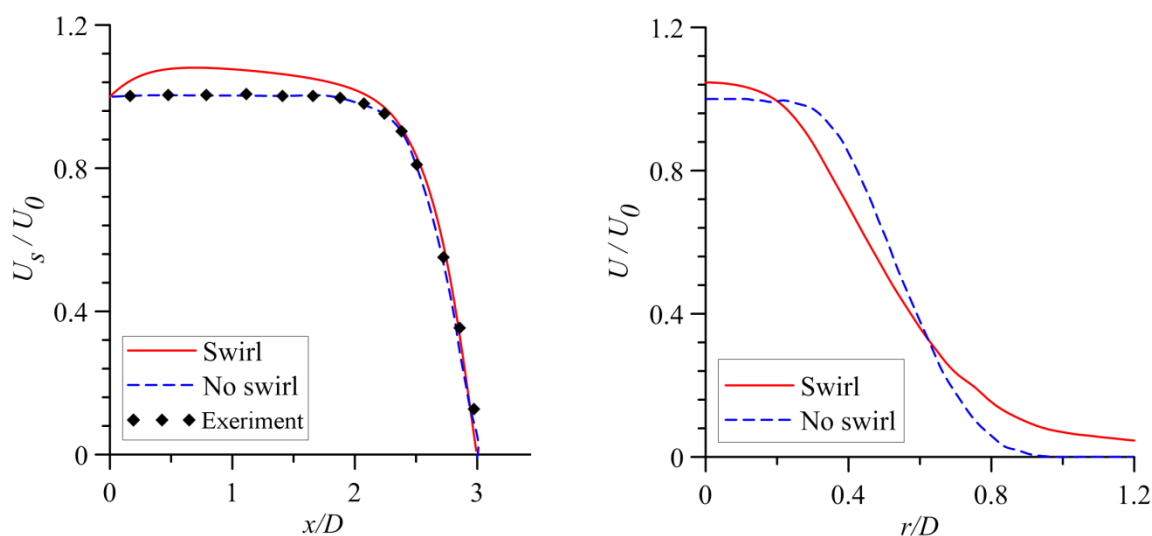


Рис. 5.4.1 Продольные (слева) и поперечные (справа $x/D=2$) профили продольной скорости для случаев $S=0$ (синяя линия) и $S=0.3$ (красная линия). Сравнение текущего расчета и эксперимента [Dulin 2016]

Ожидалось, что добавление закрутки приведет к более быстрому расширению струи из-за возникновения продольного градиента давления и эффектов центробежной силы. Подобное поведение наблюдалось в экспериментах с лопаточными завихрителями [Alekseenko et. al. 2007]. Однако, как показывают расчеты, динамика струи сильно зависит от того как именно организована закрутка. В случае вращения сужающегося сопла сила трения, действующая на поток вблизи вращающейся стенки в комбинации с силами инерции жидкости имеют результирующую составляющую направленную против основного потока. Этот эффект приводит к формированию зоны рециркуляции в области внутри сопла, которая воздействует на выходные профили скорости на срезе сопла.

Во второй части работы рассматривалась задача в следующей постановке: В качестве модели для второй части работы была выбрана установка, используемая для PIV-экспериментов в ИТ СО РАН.

Существенным различием в сравнении с предыдущей задачей является отсутствие поджатия сопла. В качестве способа задания закрутки в была выбрана вращающаяся труба с ханикомбом (протяженный участок, представляющий собой периодическую решетку из каналов), что дает преимущество в интенсификации закрутки, позволяя достигнуть больших величин закрутки и менять их в широком диапазоне, давая фактически твердый профиль окружной компоненты скорости на выходе, а также не оказывает

сопротивления потоку на входе в сопло.

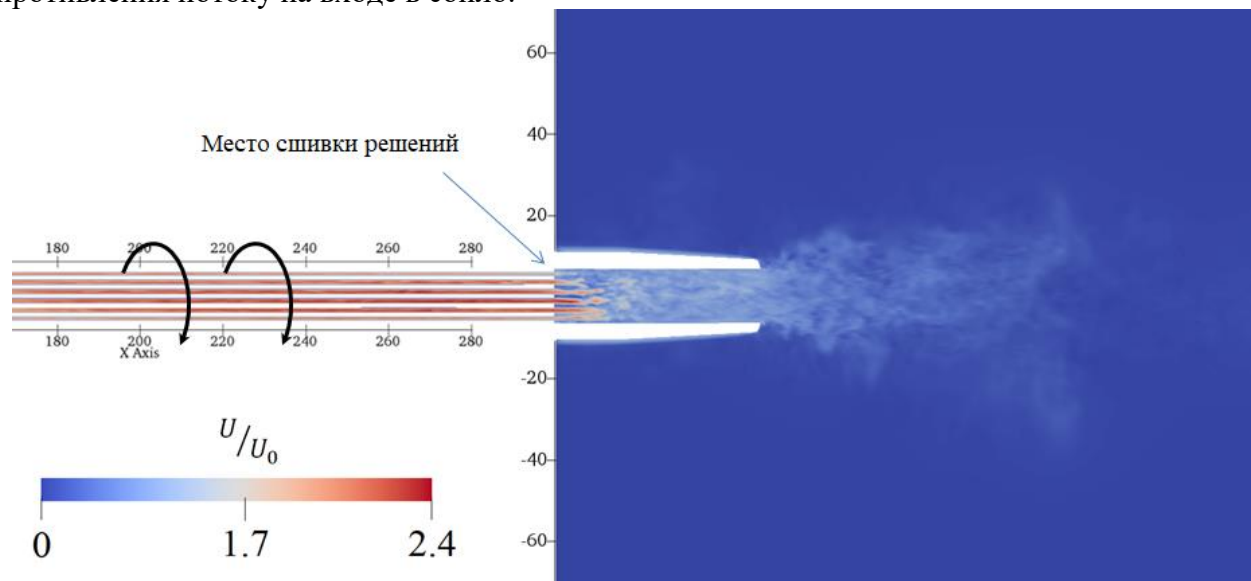


Рис. 5.4.2 Схема расчетной области.

Предполагая малость обратного влияния струи на входную трубу, было решено сделать разбиение задачи на две подзадачи для сокращения требуемых вычислительных ресурсов. Рациональным было провести расчет течения во вращающейся трубе с ханикомбом с использованием динамической сетки, вращающейся с постоянной угловой скоростью. Расчет же в струе было решено проводить на статической сетке. При этом необходимо было провести интерполяцию выходных полей с вращающейся стеки на статическую стеку для получения временных серий, используемых в качестве поля скорости для входного сечения во второй подзадаче.

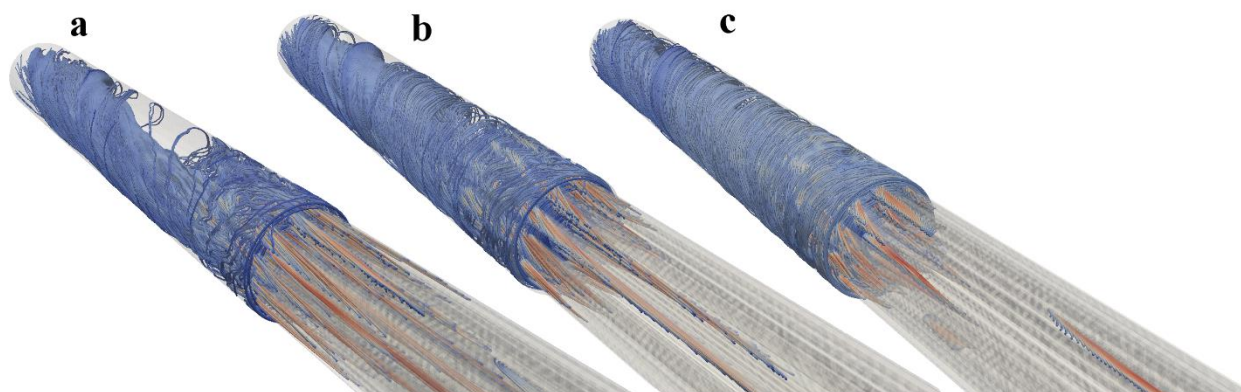


Рис. 5.4.3 Линии тока для $S=0.3$ (a), $S=0.46$ (b), $S=0.63$ (c).

Линии тока (рис.5.4.3) для различных закруток качественно демонстрируют наличие твердотельного вращения на выходе из сопла.

При этом для больших закруток происходит подавление уровня турбулентных пульсаций по сравнению с незакрученным случаем.

Рассмотрим профили осредненной по времени продольной компоненты скорости в поперечных сечениях (рис 5.4.4). Можно видеть, что на входе в сопло профили продольной скорости имеют очень похожую форму. Единственное серьезное отличие наблюдается для максимальной рассмотренной закрутки $S=0.63$, для которой профиль становится более наполненным. Для остальных же случаев профиль имеет довольно пологий вид, что говорит о существенном эффекте сопротивления потоку, оказываемому ханикомбом. На выходе из сопла профиль для максимальной закрутки начинает перестраиваться, с образованием локального минимума скорости на оси струи, что говорит о развитии существенного продольного градиента давления за счет эффекта закрутки, приводящего к торможению

потока. Для сечения $x/D=1.5$ и закрутки $S=0.63$ видно образование области рециркуляции на оси сопла, что свидетельствует о процессе вихревого распада. При этом для остальных рассмотренных закруток структура течения остается стабильной, хотя и видно замедление и расширение потока с увеличением закрутки.

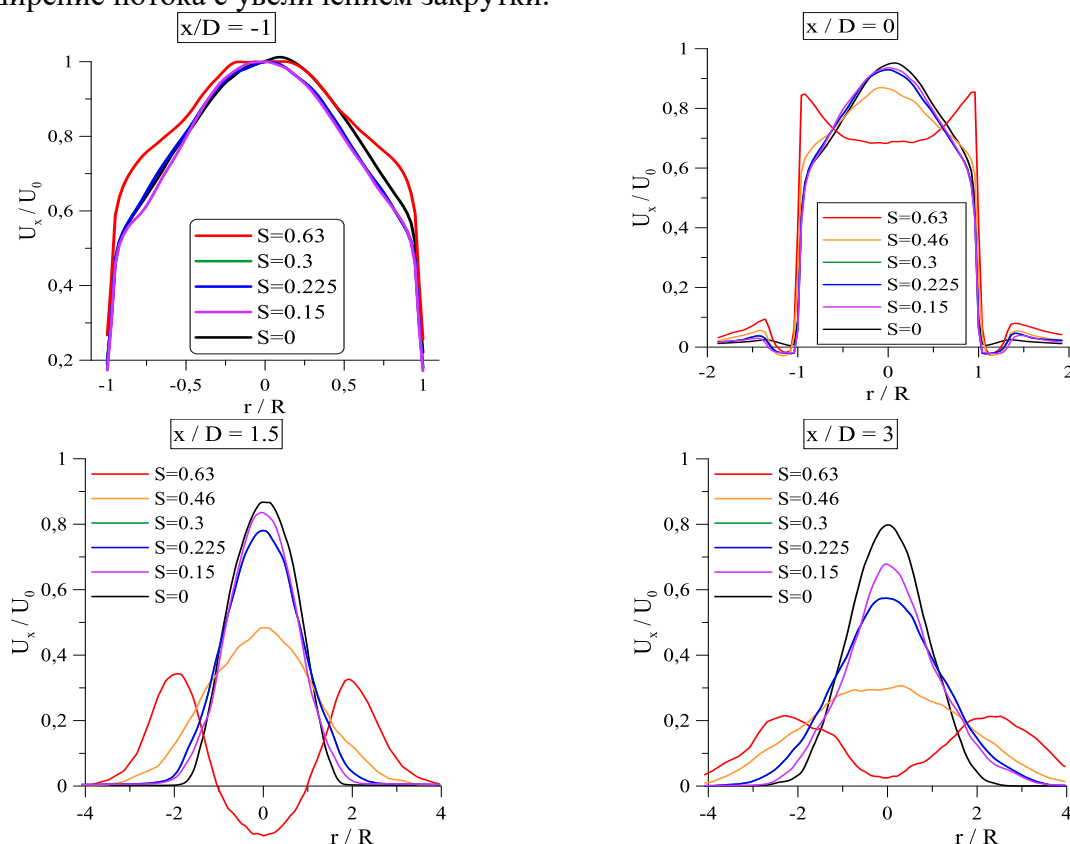


Рис. 5.4.4 Профили продольной скорости в различных поперечных сечениях.

6. Эффект от использования кластера в достижении целей работы

Возможность использования параллельных многопроцессорных вычислений позволяет проводить расчеты для более высоких чисел Рейнольдса, сохраняя при этом высокое пространственное разрешение. Это позволяет получить точные результаты расчетов, проходящие верификацию экспериментами. Таким образом, расчеты позволяют получить данные, которые недоступны для экспериментальных исследований, такие как, например, поле скорости внутри сопла.

7. Перечень публикаций, содержащих результаты работы

1. Борыняк К. И., Баженов А. Ю., Хребтов М. Ю. Исследование динамики закрученной импактной струи методом численного моделирования //МНСК-2018: Физика сплошных сред. – 2018. – С. 38-38.
2. Borynyak K. et al. Numerical simulation of a low-swirl impinging jet with a rotating convergent nozzle //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2018. – Т. 980. – №. 1. – С. 012016.
3. Борыняк К. И., Бобров М. С., Козюлин Н. Н. Численное исследование турбулентной диффузии в закрученных струях методом крупных вихрей //МНСК-2019: Физика сплошных сред. – 2018. – С. 34-34.