

УДК 532.517

DOI: 10.63430/YIA202502006

Интенсификация переноса тепла в импактной струе с фрактальной решеткой на входе*

С.Н. Яковенко

*Институт теоретической и прикладной механики
им. С.А. Христиановича СО РАН, Новосибирск*

E-mail: yakovenk@itam.nsc.ru

Численно исследована импактная струя с пассивным управлением перемешиванием и теплообменом при помощи решетки на входе. Показано, что локальное число Нуссельта в точке торможения на нагретой поверхности, с которой сталкивается струя, и число Нуссельта, осредненное по области с интенсивным теплообменом, увеличиваются с ростом числа Рейнольдса по степенному закону, отвечающему эмпирической аппроксимации. Установлено, что наложение решетки, особенно фрактальной формы, заметно усиливает перенос тепла в центральной части струи. Проведено сравнение результатов измерений с обнаруженными в расчетах эффектами и определены перспективы дальнейших исследований.

Ключевые слова: импактная струя, пассивное управление, перенос тепла, численное моделирование.

В настоящее время возрастает интерес к управлению течением и теплопереносом в струях, что связано с решением актуальных задач в сфере транспорта, энергетики, микроэлектроники и других областей, где востребованы методы управления, приводящие к усилению перемешивания и теплообмена. В отличие от активного управления, осуществляемого с помощью механических и акустических воздействий от источников продольных, поперечных и азимутальных колебаний [1, 2], которые более изучены, при пассивном управлении в область вблизи сопла струи вводятся различные объекты [3, 4].

В данной работе выполнено исследование импактной струи, натекающей на нагретую поверхность, с использованием решеток двух конфигураций на входе, как и в измерениях [2, 3], также проведено сравнение со случаем невозмущенной струи. Указанная постановка расчета струи выполнена впервые. Работа нацелена на валидацию и выяснение возможностей вихреразрешающего подхода, который предполагается применять в дополнение к лабораторным экспериментам или в качестве цифрового двойника.

Для струи воздуха, истекающей со скоростью U в направлении $z > 0$ из отверстия диаметром D с центром в точке $x = y = z = 0$, с помощью пакета программ OpenFOAM находятся решения уравнений Навье – Стокса и теплопроводности при значениях числа

* Исследование проведено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00310, <https://rscf.ru/project/23-27-00310>; работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Механика» (вычислительный кластер).

Рейнольдса $Re = UD/\nu$ от 1000 до 38500. Применяются вихреразрешающие подходы (в частности, прямое численное моделирование (DNS) и неявное моделирование крупных вихрей (ILES)), где модели турбулентности не вводятся. Как и в работе [3] для температуры T во входном сечении $z = 0$ (включая решетку) и на нагреваемой поверхности $z = 2D$ задаются значения $T_{aw} = 293$ К и $T_w = 304$ К соответственно. Согласно тестовым расчетам, рост температуры стенки (далее не рассматриваемый) до величины $T_w = 310$ К [3] приводит к результатам, идентичным для характеристик теплообмена на стенке. По нормали к боковым границам $x = \pm 4D$, $y = \pm 4D$ задаются нулевые градиенты температуры. Начальные данные (при $t = 0$) соответствуют покоящейся среде при $T = T_{aw}$ во всей области, кроме нагреваемой стенки. По мере развития импактной струи (при $t > 0$) температура возрастает в окрестности стенки ($z = 2D$), однако ближе к входной границе ($z = 0$) остается почти равной температуре окружающей среды T_{aw} в большей части области в расчете и опыте.

Во входном сечении ($z = 0$) вводится плоское препятствие, как в случаях SG2 (квадратная решетка 2) и SFG (квадратная фрактальная решетка) из [3, 4]. Форма и размеры прутьев решетки в плоскости (x, y) соответствуют экспериментальным. Вертикальная скорость w ($z = 0$) задается нулевой в соответствующих точках решетки, согласно условию непротекания (рис. 1). Невозмущенная струя без решетки далее будет обозначаться как JWT [3].

Размеры расчетной области, составляющие $8D \times 8D \times 2D$, и число ячеек сетки выбраны с учетом фиксации контрольного окна $6D \times 6D$ (в которых выполняется сравнение с данными опытов) для часто рассматриваемого случая с расстоянием $H = 2D$ от входа до стенки [3, 4] и для достижения приемлемой сходимости получаемых результатов к независимым от численных параметров решениям. На начальном этапе этот выбор H представляется оптимальным для валидации вихреразрешающего подхода, влияние H/D планируется выяснить в дальнейшем.

Для изучения теплообмена на стенке, согласно [3, 4], число Нуссельта определено как $Nu = q_w D / [\kappa(T_w - T_{aw})]$, где $q_w = \kappa |\partial T / \partial z|_{z=2D}$ — поток тепла на стенке, κ — коэффициент теплопроводности. Для определения q_w температура осредняется при $\Delta t = t_1 - t_0$,

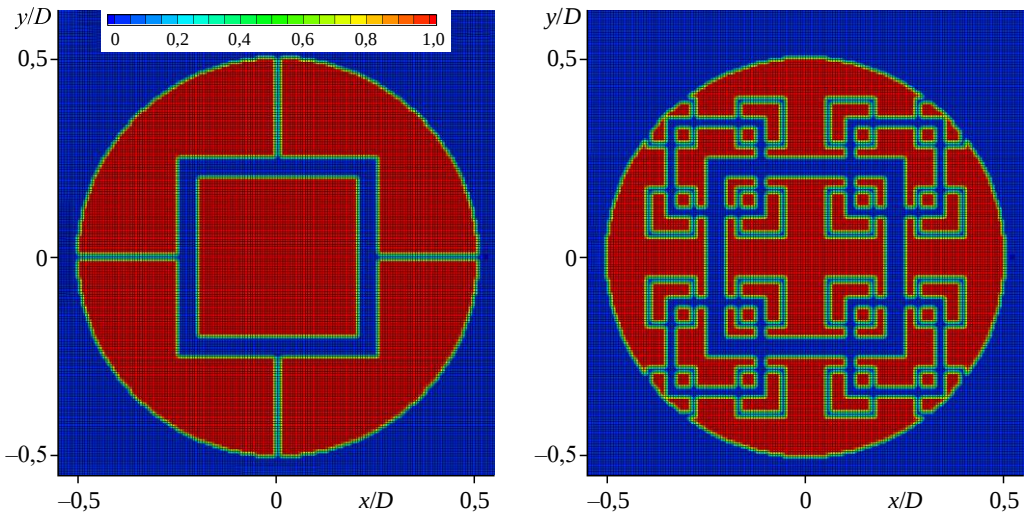


Рис. 1. Изолинии $w(x, y)$ (показаны цветом) в сечении $z = 0$, иллюстрирующие элементы решетки на входе для конфигураций SG2 (слева) и SFG (справа) из работ [32, 4] и ячейки сетки 2 (черные линии).

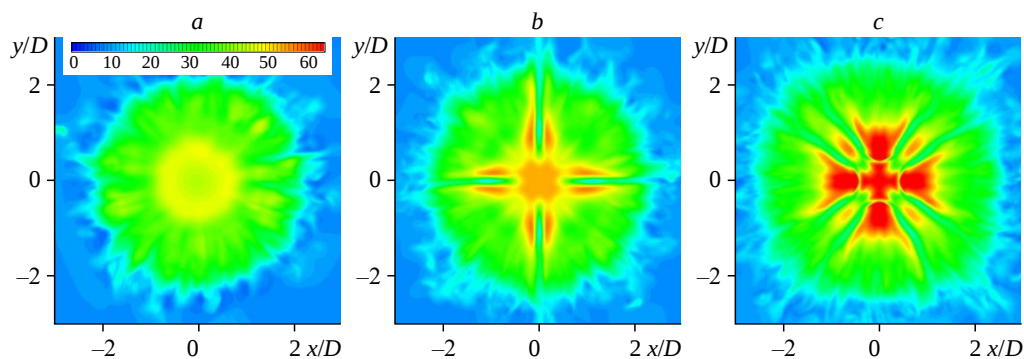


Рис. 2. Изолинии числа Нуссельта $Nu(x, y)$ в расчетах на сетке 1 при $Re = 5000$.

Случай без решетки — вариант JWT (a) и с решеткой — варианты SG2 (b), SFG (c).

где Δt и t_0 выбраны достаточно большими. Изолинии $Nu(x, y)$ показывают (рис. 2) усиление переноса тепла в центральной части струи при введении решетки даже простой конфигурации SG2 и проявление «отпечатка» решетки на стенке (в зоне, гораздо большей размеров решетки и отверстия). Подобные эффекты в распределении $Nu(x, y)$ наблюдались в исследованиях [3, 4] при $15000 \leq Re \leq 38500$ для струи без решетки и с различными решетками на входе.

Для проверки сеточной сходимости сначала выполнялись расчеты на равномерной грубой сетке ($640 \times 640 \times 160$) с кубическими ячейками размером $\delta = D/80$ (сетка 1), затем на неравномерных средней ($674 \times 674 \times 90$) и мелкой ($1116 \times 1116 \times 118$) сетках с минимальными размерами ячеек $\delta = D/160$ и $\delta = D/320$ (сетки 2 и 3) соответственно.

Сетки 2, 3 включают равномерные ячейки при $|x| \leq D$, $|y| \leq D$ у нижней ($z = 0$) и верхней ($z = 2D$) границ, где нужно аккуратно разрешать процессы выхода струи из отверстия, особенно при обтекании решетки, и пограничные слои на нагретой поверхности, где велики градиенты скорости и температуры. При удалении от оси в направлениях $|x| > D$, $|y| > D$ и по z от границ к центру ($z = D$) ячейки разрежаются согласно геометрической прогрессии с отношением размеров соседних ячеек $q_x = q_y = 1,01$, $q_z = 1,05$. Расчеты на сетке 1 показали, что с дальнейшим уменьшением величин q_x , q_y , q_z до единицы решения почти не меняются, особенно ближе к центру ($r < 2D$). Из зависимости локального числа Нуссельта в точке торможения потока $Nu_0 = Nu(x = y = 0)$ от числа Рейнольдса (рис. 3) видно, что отклонение результатов на сетке 3 от эмпирической степенной зависимости мало при $Re \leq 38500$ для случая JWT и при $Re \leq 15000$ для SFG, как и для сетки 2 при меньших Re , поэтому возможно более корректное сопоставление с данными [3, 4], чем для грубой сетки 1. Отклонение расчетных точек вниз от измеренных значений с ростом Re связано с тем, что градиенты температуры на нагретой стенке увеличиваются при больших Re и для их описания размеры ячеек грубых сеток являются уже недостаточно мелкими.

Помимо локального числа Нуссельта для сравнения с данными измерений [3, 4] найдено осредненное по круговой области число Нуссельта:

$$Nu^*(r) = \frac{1}{\pi r^2} \int_0^{2\pi} \int_0^r Nu(r', \theta) r' dr' d\theta, \quad Nu_1 = Nu^*(r = 3D), \quad Nu_0 = Nu^*|_{r \rightarrow 0}.$$

Также в области с максимальным теплообменом (рис. 2) введено «глобальное» число Nu_1 (рис. 3). Наблюдается (рис. 2–4) сильная интенсификация теплопереноса

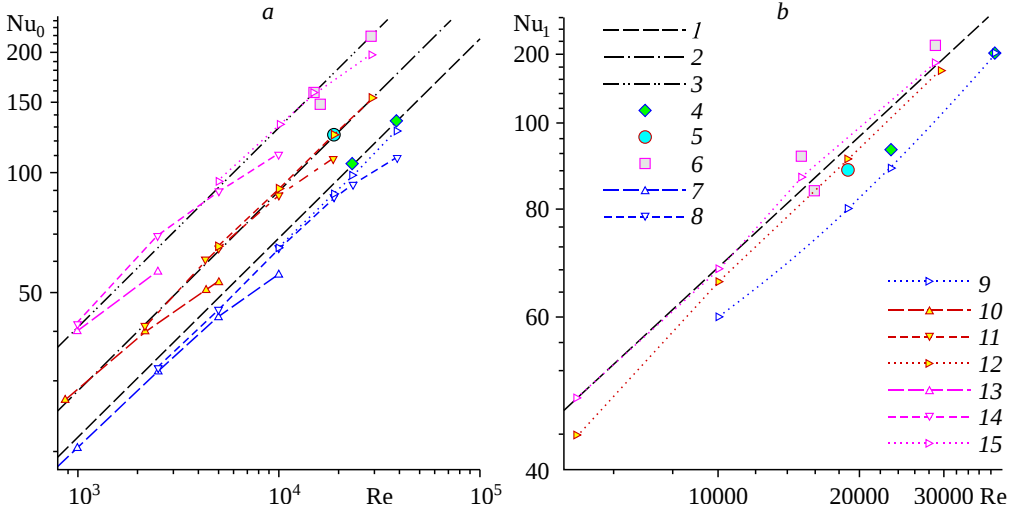


Рис. 3. Зависимости $Nu_0(Re)$ (a) и $Nu_1(Re)$ (b): степенные функции $0,685Re^{1/2}$ (1), $0,9Re^{1/2}$ (2), $1,3Re^{1/2}$ (3), аппроксимирующие результаты измерений [3, 4] для JWT (4), SG2 (5), SFG (6); настоящие расчеты на сетках 1 (7, 10, 13), 2 (8, 11, 14), 3 (9, 12, 15) соответственно для JWT (7, 8, 9), SG2 (10, 11, 12), SFG (13, 14, 15).

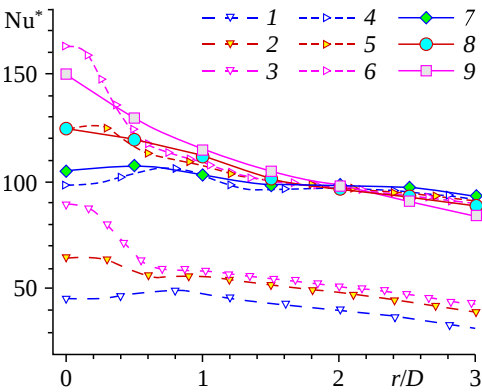


Рис. 4. Профили $Nu^*(r)$: расчеты на сетках 2 (1–3) и 3 (4–6), измерения [3, 4] (7–9) при $Re = 5000$ (1–3), 23200 (4, 7), 18800 (5, 8), 16000 (6, 9) для случаев JWT (1, 4, 7), SG1 (2, 5, 8), SFG (3, 6, 9).

в центре струи при введении решетки SG2 и особенно при введении SFG, что хорошо согласуется с данными опытов. Для фиксированного Re усиление потока тепла на стенке происходит по всей области, а для фиксированной входной мощности (зависящей от расхода в подающей трубке и перепада давления, возрастающего при вводе решетки) [3] — при $r < 2D$ (рис. 4).

Небольшое занижение численных результатов для случая без решетки можно объяснить неточным заданием профиля скорости и уровня возмущений на входе. Эта информация отсутствует в исследованиях [3, 4]. Известно только, что длина подводящей трубки, на конце которой вводилась решетка и начиналось затопленное пространство, составляла $L = 6D$, а в приточной камере перед входом в трубку ставились хонейкомбы для разрушения вихревых структур и выравнивания потока. По-видимому, в случае JWT на выходе из трубки возникал тонкий пограничный слой, наложенный на «ударный» профиль постоянной по сечению скорости с малым уровнем пульсаций, а наложение решетки SG2, и особенно SFG, порождало множество вихревых структур в следе и, как следствие, интенсификацию переноса тепла. В представленных расчетах для простоты и из-за отсутствия соответствующей информации в работах [3, 4] профиль на входе скорости задан ударным, а уровень возмущений — нулевым. Влияние этих факторов и параметра H/D планируется изучить в будущем.

Список литературы

1. Шевченко А.К., Яковенко С.Н. Численное исследование методов управления потоком и эффектов расщепления в круглой затопленной струе // Теплофизика и аэромеханика. 2021. Т. 28, № 3. С. 379–395.
2. Шевченко А.К., Яковенко С.Н. Вибрационное возбуждение и бифуркация круглой струи при небольших числах Рейнольдса // Теплофизика и аэромеханика. 2024. Т. 31, № 5. С. 915–939.
3. Cafiero G., Discetti S., Astarita T. Heat transfer enhancement of impinging jets with fractal-generated turbulence // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2014. Vol. 75. P. 173–183.
4. Cafiero G., Castrillo G., Greco C.S., Astarita T. Effect of the grid geometry on the convective heat transfer of impinging jets // Intern. J. Heat Mass Transfer. 2017. Vol. 104. P. 39–50.

*Статья поступила в редакцию 30 ноября 2024 г.,
принята к публикации 5 декабря 2024 г.*