

Моделирование развития неустойчивости в плоской затопленной струе при небольших числах Рейнольдса

А. К. Шевченко, С. Н. Яковенко

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

Аннотация

Выполнено численное моделирование плоской затопленной струи при числе Рейнольдса $32 \leq Re \leq 160$, основанном на средней входной скорости и высоте плоской щели на входе в струю, при помощи уравнений неразрывности и уравнений Навье – Стокса для несжимаемой жидкости. Изучено влияние изменения Re на характер течения при отсутствии и задании малых случайных возмущений на входе в струю. Результаты настоящих расчетов согласуются с имеющимися данными лабораторных экспериментов и показывают ламинарное состояние течения на первом участке у выхода из щели, асимметричную неустойчивость синусоидального вида на втором, переходном, участке и нерегулярный турбулентный характер течения на третьем участке. Получено, что длина первого и второго участков уменьшается с ростом амплитуды малых случайных возмущений, вводимых путем искажения профиля скорости на входе. Кроме того, увеличение числа Рейнольдса приводит к меньшей протяженности ламинарного участка, что согласуется с данными предыдущих работ. Проведена оценка характерных значений длины волны колебаний, соответствующих выявленному эффекту синусоидальной неустойчивости, и характерной частоты этих колебаний, которая резко возрастает с ростом Re .

Ключевые слова

плоская струя, ламинарное течение, неустойчивость, переход к турбулентности, численное моделирование, поле скорости, случайные возмущения

Благодарности

Работа выполнена при поддержке ИВЦ НГУ, предоставившего вычислительные ресурсы для проведения расчетов

Для цитирования

Шевченко А. К., Яковенко С. Н. Моделирование развития неустойчивости в плоской затопленной струе при небольших числах Рейнольдса // Сибирский физический журнал. 2018. Т. 13, № 4. С. 35–45. DOI 10.25205/2541-9447-2018-13-4-35-45

Simulation of Instability Development in a Plane Submerged Jet at Low Reynolds Numbers

A. K. Shevchenko, S. N. Yakovenko

*Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS
Novosibirsk, Russian Federation*

Abstract

Numerical simulation of a plane submerged jet with Reynolds number of $32 \leq Re \leq 160$ based on the mean inlet velocity and the flat slit height at the jet entrance is performed using the continuity and Navier – Stokes equations for incompressible fluid. The influence of changes in Re on the flow nature is studied with assignment of small random perturbations at the jet inlet and in the absence of these perturbations. In agreement with the available data of laboratory experiments, the present computation results show the laminar flow state in the first region near the exit from the slit, the asymmetric instability of sinusoidal type in the second, transitional region, and the irregular, turbulent nature of the flow in the third region. It is found that the lengths of the first and second sections decrease with increasing ampli-

tude of small random perturbations introduced by distortion of the inlet velocity profile. Moreover, an increase in the Reynolds number leads to a shorter extension of the laminar section in agreement with the data of previous studies. Estimations are made for typical values of the wavelength of oscillations corresponding to the revealed effect of sinusoidal instability and for the typical frequency of these oscillations, which sharply increases with the growth of Re .

Keywords

plane jet, laminar flow, instability, transition to turbulence, numerical simulation, velocity field, random perturbations

Acknowledgements

The study was performed with support by the Information-Computing Centre of NSU, which provided computing resources

For citation

Shevchenko A. K., Yakovenko S. N. Simulation of Instability Development in a Plane Submerged Jet at Low Reynolds Numbers. *Siberian Journal of Physics*, 2018, vol. 13, no. 4, p. 35–45. (in Russ.) DOI 10.25205/2541-9447-2018-13-4-35-45

Введение

В последнее время в связи с миниатюризацией технических устройств наблюдается повышенное внимание к микроструйным течениям (см., например, [1–6]), связанное с развитием микроэлектромеханических систем, водородной энергетики и других отраслей науки и промышленности, где внимание уделяется вопросам струйного истечения из малоразмерных устройств и возможности влиять на них с помощью методов управления. Например, в авиации микроструи могут применяться для охлаждения передних кромок лопаток турбин двигателей и предотвращения обледенения обшивки фюзеляжей самолета, в химической промышленности – для сушки микрообъемов материалов и окрашивания микроповерхностей, в микроэлектронике – для отвода тепла от поверхностей микрочипов. Отметим здесь и применение пульсирующих струй для воздействия на основные источники шума от самолетов – крупные турбулентные вихри в выхлопных потоках авиадвигателей [7]. Кроме того, процессы струйного истечения водорода из форсунок и сопел различных типов горелок представляют интерес с точки зрения повышения устойчивости пламени и снижения выбросов в атмосферу оксидов азота. Возникает потребность в методах управления этими процессами. В частности, под влиянием акустики, в струе формируется вихревая структура, которая способствует росту подсоса воздуха, повышению степени смешения смеси топливо-воздух, устойчивости пламени, снижению температуры и длины пламени и, как результат, сокращению эмиссии вредных веществ [4].

В одном из первых экспериментальных исследований микроструй [1] приведена зависимость протяженности ламинарного участка струи перед ее переходом к турбулентному состоянию от числа Рейнольдса, и показаны соответствующие картины истечения микроструй. В [2] изучены особенности дозвуковых плоских и круглых микроструй и установлено, что развитие плоских струй связано с механизмом асимметричной (синусоидальной) неустойчивости. Также обнаружены эффекты расщепления струи на две, развивающиеся независимо друг от друга, и преобразования круглой струи в плоскую под действием поперечного акустического поля. В [3; 4] приведены результаты исследования горения пропана и водорода в микроструях при воздействии акустики. В [5; 8] продемонстрировано, как и в [2], развитие асимметричной моды неустойчивости. Кроме того, в [5] проанализирована зависимость координаты ламинарно-турбулентного перехода затопленной струи от числа Рейнольдса, аналогичная результатам из [1]. В [8] также исследована эволюция свободной и пристеночной струи, в частности переход к турбулентному режиму течения, и рассмотрено развитие вихревых структур.

Результаты лабораторных экспериментов [1–5] послужили мотивацией настоящей работы. Отметим незначительное количество работ по исследованию микроструйных течений по сравнению с макроструями, что связано со сложностью измерений и вычислений высокой точности в небольших устройствах сложной формы. Нестационарный расчет микроструй,

для которых характерны, как правило, небольшие числа Рейнольдса, требует весьма мелких сеток и больших размеров области расчета, чтобы и учесть малые размеры входной щели, и проследить развитие неустойчивости с переходом в турбулентное состояние на относительно большом расстоянии от входа. Это затрудняет проведение адекватного численного моделирования. В [6] получены предварительные результаты расчета микроструй в виде стационарных решений двумерных уравнений движения, полученных в нижней половине плоской ламинарной струи при условии симметрии в ее центре (на верхней границе области расчета). Данные [6] показали качественно правильную картину развития течения и асимптотическое стремление с ростом продольной координаты к точному аналитическому решению для струи из точечного источника [9]. Цель настоящего исследования – выполнить компьютерное моделирование развития неустойчивости плоской затопленной струи при небольших числах Рейнольдса и выяснить, согласуются ли полученные в физических и численных экспериментах результаты.

Постановка численных экспериментов

Использованы двумерные нестационарные уравнения неразрывности и уравнения Навье – Стокса для несжимаемой жидкости в прямоугольных декартовых координатах (x, y) . Расчеты проведены в программном пакете OpenFOAM¹, основанном на решении уравнений механики жидкости и газа методом конечных объемов (см., например, [10]). В файловой системе OpenFOAM выбран решатель isoFoam, и сделаны необходимые изменения для учета особенностей рассматриваемой задачи – плоской струи воздуха, вытекающей из узкой щели высотой $h = 0,2$ мм (как и в [1; 2]). Выбраны числа Рейнольдса $Re = u_0 h / \nu = 32, 80, 160$, соответствующие данным [1] и входной скорости $u_0 = 2,4, 6, 12$ м/с истечения струи из щели, где ν – кинематическая вязкость.

На предварительных этапах исследования варьировались параметры численной реализации, где изучалось влияние шагов по пространству и времени, размеров области расчета, граничных условий, разностных схем на точность получаемых данных. Применены специальные критерии сравнения решений [11] (например, найденных на разных сетках) для получения независимого от деталей численной реализации решения. В результате выбраны параметры и граничные условия, приведенные в табл. 1 и 2, где Δt – шаг по времени, L_x и L_y – длина и ширина расчетной области, Δx_{\min} и Δy_{\min} – минимальные размеры ячейки, α_x и α_y – коэффициенты расширения сетки по геометрической прогрессии при $x > 0$ и $|y - L_y/2| > h$ соответственно.

Построенная неравномерная расчетная сетка содержала 268×394 ячеек; схема вычислительной области показана на рис. 1. Параллельные вычисления с количеством шагов Δt около 10^5 занимали в среднем четыре часа на 16 ядрах вдвоенных 4-ядерных процессоров кластера ИВЦ НГУ.

Начальные условия соответствуют покоящейся среде: $u(x, y, t = 0) = v(x, y, t = 0) = 0$ (кроме части входного сечения, Inlet, соответствующей выходу из щели) и $p(x, y, t = 0) = 0$.

Результаты моделирования

Первая серия расчетов (рис. 2) проведена для изучения роста возмущений из-за наличия численной неустойчивости, выступающей триггером для развития физической неустойчивости. Это развитие может быть связано со снижением (при увеличении Re) вклада молекулярной вязкости в уравнениях Навье – Стокса по сравнению с конвективным членом, ответственным за рост неустойчивости. Полученные результаты сопоставлены с данными визуализации из [1]. Очевидно, результаты при $Re = 32$ (рис. 2, а) воспроизводят поведение

¹ <https://ru.wikipedia.org/wiki/OpenFOAM/>.

струи, наблюдаемое в опыте [1] при $16 \leq Re \leq 48$ на достаточно больших расстояниях от щели. Однако с ростом числа Рейнольдса результаты расчета (рис. 2, б-з) и эксперимента [1]

Таблица 1

Оптимальные параметры вычислений

Table 1

Optimal parameters of computations

Расчетная схема	$\Delta t(u_0/h)$	L_x/h	L_y/h	$\Delta x_{\min}/h = \Delta y_{\min}/h$	α_x	α_y
Gauss Linear [10] (аналог центрально-разностной схемы для конвективных слагаемых)	0,0144	300	200	0,025	1,013	1,05

Таблица 2

Граничные условия [10]

Table 2

Boundary conditions [10]

Название и координаты границы	Условия для компонент вектора скорости (u, v)	Условия для давления p
Inlet ($x = 0, y - L_y/2 < h/2$)	Постоянное значение скорости $u(y) = u_0$ (ударный профиль)	zeroGradient – нулевой градиент давления
Wall ($x = 0, y - L_y/2 \geq h/2$)	noSlip – условие прилипания	
Top ($y = L_y$)	inletOutlet – условие истечения, позволяющее не только выход, но и вход течения в расчетную область в случае обратного потока	Advective – адвективное истечение, не допускающее отражения волн
Bottom ($y = 0$)		
Outlet ($y = L_x$)		

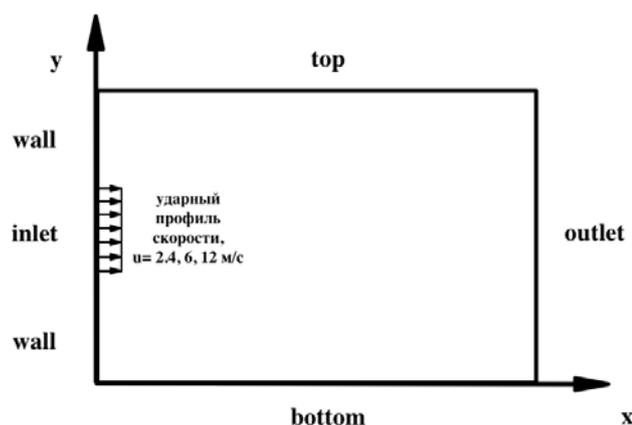


Рис. 1. Схема границ области расчета

Fig. 1. Scheme of computation domain boundaries

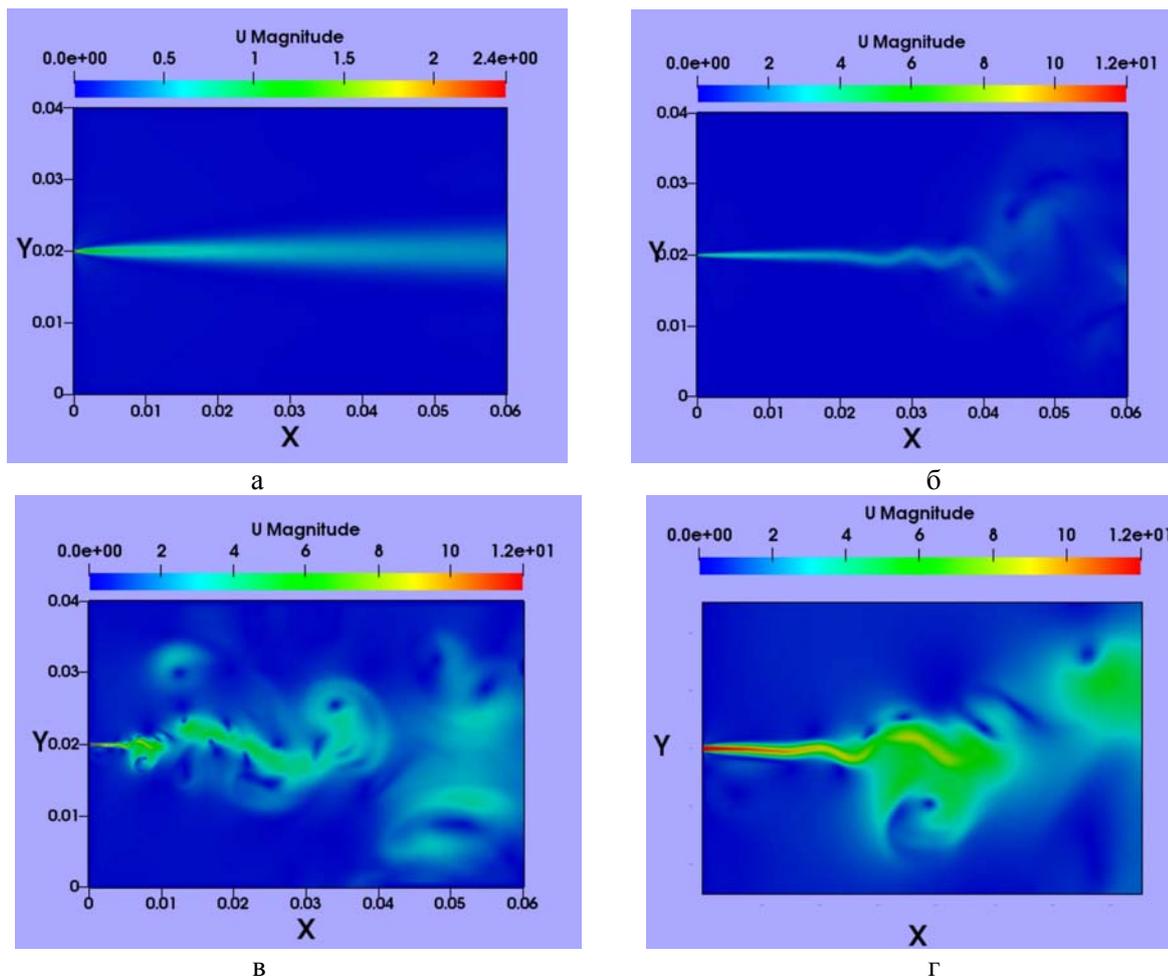


Рис. 2. Изолинии амплитуды вектора скорости (м/с) на плоскости (x, y) координат (в метрах) при $Re = 32$ (а), 80 (б), 160 (в); картина течения при $Re = 160$ (г) увеличена в четыре раза для иллюстрации различных участков струи

Fig. 2. Contours of the velocity vector magnitude (m/s) on the plane (x, y) of coordinates (in meters) at $Re = 32$ (a), 80 (b), 160 (c); the flow pattern at $Re = 160$ (d) is enlarged four times to illustrate various parts of the jet

начинают расходиться. Струя, полученная в настоящем расчете, как и в [5], может быть условно разделена на три участка: на первом «спокойное» ламинарное течение, где нет каких-либо возмущений; на втором поток приобретает асимметричную неустойчивость синусоидального типа; на третьем, очевидно, вследствие развития этой неустойчивости струя разрушается, что можно трактовать как переход к турбулентному режиму. В [1] на картинах течения второй участок не наблюдался, и струя сразу переходила от ламинарного к турбулентному режиму, при этом было измерено расстояние L от выхода струи из щели до точки разрушения ламинарного режима при различных числах Re . Вероятно, в [1] синусоидальная неустойчивость всё же имела место, однако ее выявление затруднялось условиями проведения эксперимента и регистрации результатов.

С другой стороны, полученные в вычислениях картины течения на переходном (втором) участке с синусоидальной неустойчивостью соответствуют осциллирующему поведению струи, обнаруженному в опыте [5] при числе $Re = 172$, основанном на среднерасходной скорости (для параболического профиля Пуазейля) на выходе из щели, и в работе [2] (рис. 3).

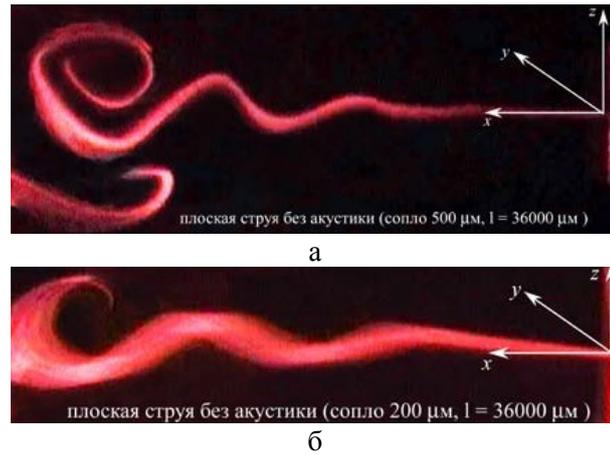


Рис. 3. Визуализация течения плоской микроструи без акустического воздействия (из [2], с разрешения авторов) при $h = 0,5$ мм (а) и 0,2 мм (б)

Fig. 3. Flow visualization of a flat microjet without acoustic action (from [2], with permission of the authors) at $h = 0.5$ mm (a) and 0.2 mm (b)

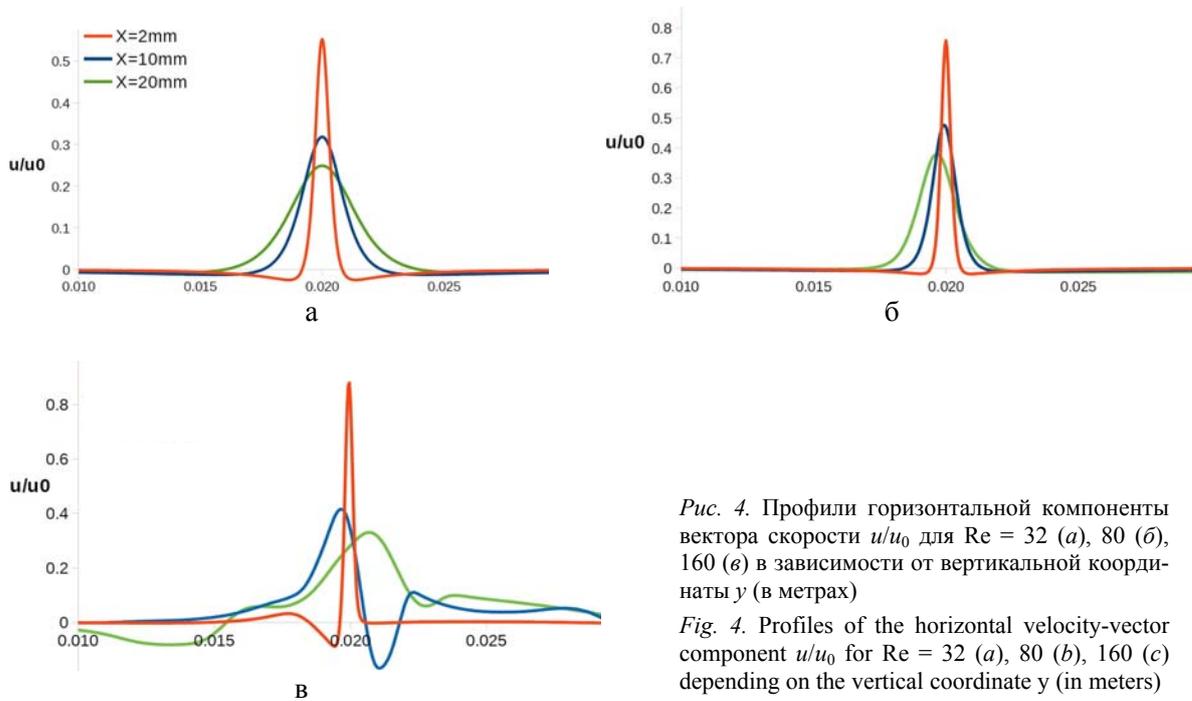


Рис. 4. Профили горизонтальной компоненты вектора скорости u/u_0 для $Re = 32$ (а), 80 (б), 160 (в) в зависимости от вертикальной координаты y (в метрах)

Fig. 4. Profiles of the horizontal velocity-vector component u/u_0 for $Re = 32$ (a), 80 (b), 160 (c) depending on the vertical coordinate y (in meters)

На рис. 4 для трех различных чисел Рейнольдса построены полученные в расчетах профили скорости на расстояниях $x = 2, 10, 20$ мм от входного сечения.

Эволюция $u(y)$ подтверждает ламинарное поведение течения при $Re = 32$ с симметричным расплыванием струи под действием молекулярной диффузии (рис. 4, а) и неустойчивое поведение при $Re = 80$ с отклонением от плоскости симметрии (рис. 4, б). При $Re = 160$ виден турбулентный характер движения с немонотонным поведением $u(y)$ (рис. 4, в), показывающим преобладание влияния конвекции над молекулярной вязкостью с ростом числа Рейнольдса.

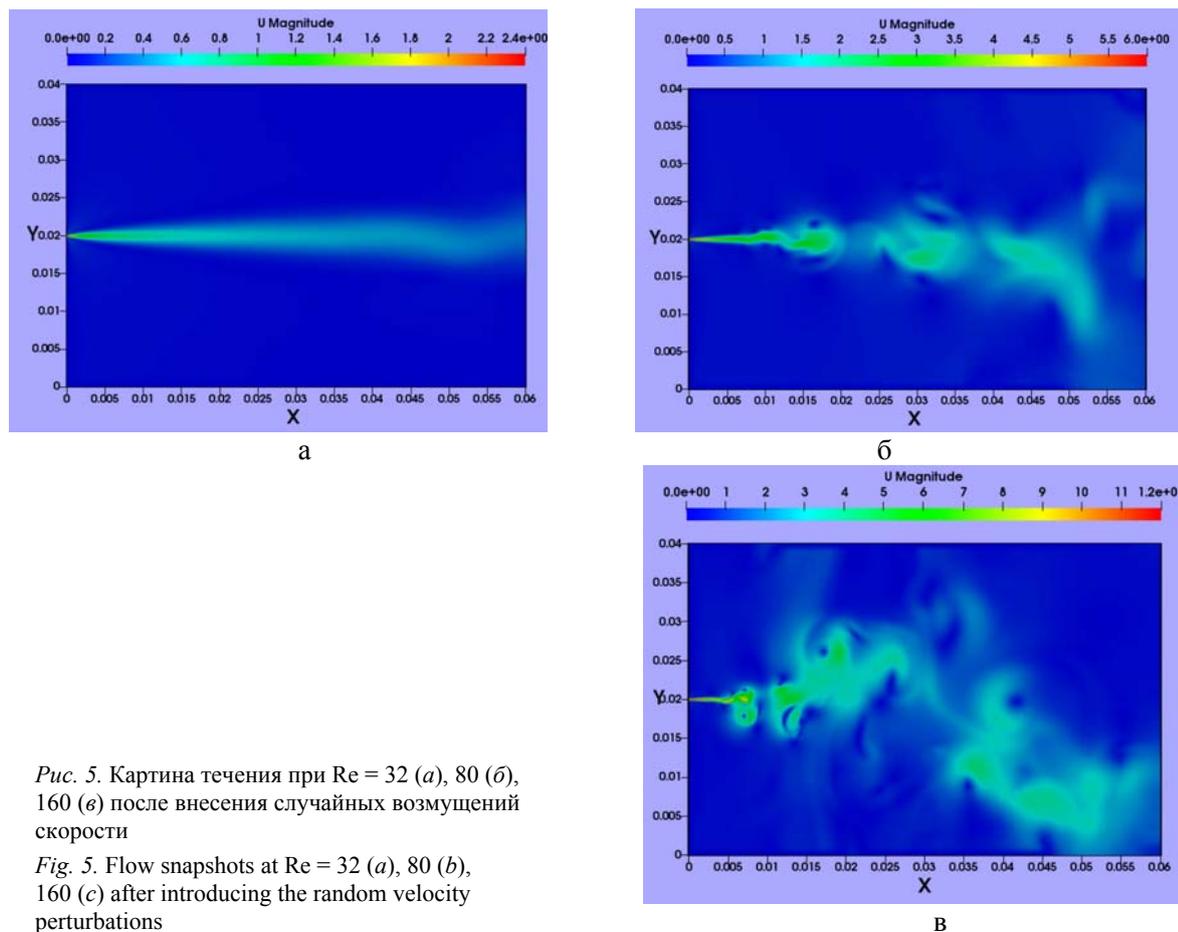


Рис. 5. Картина течения при $Re = 32$ (а), 80 (б), 160 (в) после внесения случайных возмущений скорости

Fig. 5. Flow snapshots at $Re = 32$ (a), 80 (b), 160 (c) after introducing the random velocity perturbations

Следует отметить, что в физическом эксперименте имеют место неустранимые возмущения различной природы, которые сообщаются потоку и провоцируют развитие неустойчивости и турбулентности. С другой стороны, в расчете возможны проявления ошибок округления и численной неустойчивости, зависящие от используемых схем, алгоритмов, разрешения сетки и также способствующие появлению и росту возмущений (см. рис. 2). Кроме того, можно ввести случайные возмущения, аналогичные наблюдаемым в природе, например, небольшим искажением входного профиля скорости вдоль оси x (рис. 5).

Случайные возмущения введены с помощью встроенного граничного условия *turbulent-Inlet* в OpenFOAM с фиксированной амплитудой возмущения ($u_{\max} = 0,05$ м/с), составляющей малую величину (в пределах 2 %) от входной средней скорости u_0 для рассматриваемого диапазона чисел Re . В результате поведение струи при $Re = 32$ показывает синусоидальную неустойчивость (рис. 5, а) в отличие от случая $u_{\max} = 0$ (см. рис. 2, а): при этом, по-видимому, снижается критическое число Рейнольдса, при котором наблюдается переходной участок струи, а также уменьшается длина ламинарного участка. Демонстрируя те же тенденции, участки 1 и 2 для струй при $Re = 80, 160$ значительно сократились после ввода возмущений (см. рис. 2, 5, б, в).

В [1] проанализирована зависимость протяженности ламинарного участка струи L/h от числа Рейнольдса, и приведены результаты, дополненные в [5] и в настоящей работе (рис. 6). Можно видеть, что совместное влияние численной неустойчивости и случайных возмущений в расчетах оказалось больше, чем для реальных возмущений в экспериментах

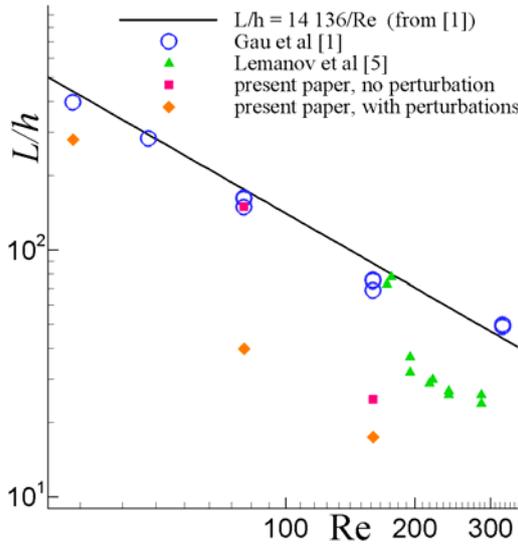


Рис. 6. Положение точки ламинарно-турбулентного перехода в зависимости от Re в настоящей работе и в [1; 5]

Fig. 6. The position of the laminar-turbulent transition point depending on Re in the present study and in [1; 5]

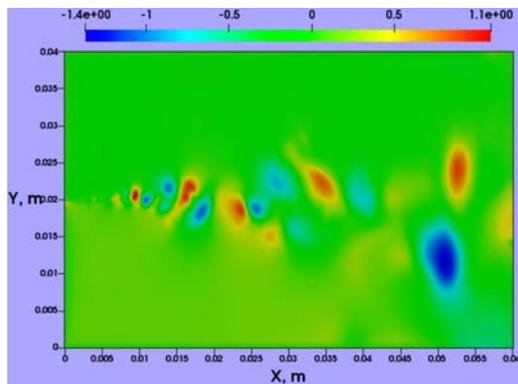


Рис. 7. Изолинии вертикальной компоненты вектора скорости $v(x, y)$ в м/с, пример для Re = 80 с возмущениями

Fig. 7. Contours of the vertical velocity-vector component $v(x, y)$ in m/s, an example for Re = 80 with perturbations

Таблица 3

Оценка характеристик колебаний синусоидальной неустойчивости из результатов расчета

Table 3

Estimation of oscillation characteristics of sinusoidal instability from the computation results

Число Рейнольдса	Входная скорость струи	λ , мм	λ/h	v^* , м/с	f , Гц
Re = 80	Без возмущений	13	65	0,5	40
	С возмущениями	2,5	12,5	0,6	240
Re = 160	Без возмущений	6	30	2,5	420
	С возмущениями	2	10	3,0	1 500

[1; 5], хотя их уровень в [5] и [9], очевидно, был также неодинаковым и приводил к отличию L в этих работах примерно в два раза для $Re > 180$. Кроме того, уменьшение амплитуды случайных возмущений в расчетах приводит к росту L/h , с наилучшим совпадением для $Re = 80$ с данными [1].

По данным вычислений можно оценить длину волны колебаний, которые соответствуют выявленному эффекту синусоидальной неустойчивости струи. Действительно, распределения $v(x, y)$ демонстрируют знакопеременный характер вдоль оси x (рис. 7), и можно измерить расстояние между сечениями с соседними максимумами (минимумами) распределений.

В табл. 3 приведены эти расстояния как длины волн колебаний λ , а также характерные скорости осцилляций по вертикали v^* (найденные из среднеквадратичной скорости), откуда получается характерная частота колебаний $f (\approx v^*/\lambda)$. Видно, что с ростом Re и амплитуды возмущений второй участок, где наблюдаются колебания синусоидальной неустойчивости, сдвигается ближе к щели, длина волны падает, а скорость осцилляций по вертикали возрастает, что, в свою очередь, приводит к резкому росту частоты «самовозбуждения» струи. Отметим, что при $Re = 80$ значение $\lambda = 13$ мм оказывается сравнимо по порядку величины с $\lambda = 50$ мм для плоской макроструи в [12], а частота $f = 40$ Гц близка к величине $f = 30$ Гц, полученной в [12] для самовозбуждения струи без наложенных акустических колебаний.

Заметим, что в [2; 5; 8] синусоидальная неустойчивость струи в итоге приводит к закрутке в «спирали» (см., например, рис. 3), тогда как в численном эксперименте схожие структуры имеют иной вид (см. рис. 2, 5). Это может быть связано с тем, что расчеты выполнены в двумерной области. Для адекватного описания поздних стадий развития неустойчивости и перехода к турбулентности необходимо провести трехмерные расчеты в продолжение настоящей работы.

Заключение

В работе выполнено численное моделирование плоской затопленной струи при небольших числах Рейнольдса на основе уравнений Навье – Стокса и изучено влияние изменения Re на характер течения при отсутствии и задании малых случайных возмущений на входе в струю. Результаты настоящих расчетов, как и в экспериментах, показывают ламинарное состояние течения на первом участке у выхода из щели, синусоидальную неустойчивость на втором, переходном, участке и нерегулярный турбулентный характер течения на третьем участке. Показано, что с ростом амплитуды случайных возмущений, аналогичных наблюдаемым в природе и вводимых путем искажения профиля скорости на входе, уменьшается длина первого и второго участков. Кроме того, увеличение числа Re приводит к меньшей протяженности ламинарного участка в согласии с данными предыдущих работ. Проведена оценка длины волны колебаний λ , соответствующих выявленному эффекту синусоидальной неустойчивости, и их характерной частоты f , резко возрастающей с ростом Re . Для получения более точных результатов необходим переход к трехмерным расчетам.

Естественным продолжением настоящей работы также является изучение влияния входного распределения скорости и искусственного задания не только случайных возмущений, но и гармонических колебаний различной частоты на границах расчетной области, моделирующих акустическое воздействие для плоской и для круглой струи [2], на развитие неустойчивости.

Результаты работы проясняют механизмы роста возмущений и перехода к турбулентности в струе и могут применяться в задачах энергетики и транспорта, в частности в задаче управления потоком для снижения шума и сопротивления летательных аппаратов и экономии топлива.

Список литературы / References

1. Gau C., Shen C. H., Wang Z. B. Peculiar phenomenon of micro-free-jet flow. *Phys. Fluids*, 2009, vol. 21, paper no. 092001, p. 1–13.
2. Козлов В. В., Грек Г. Р., Литвиненко Ю. А., Козлов Г. В., Литвиненко М. В. Дозвуковые круглая и плоская макро- и микроструи в поперечном акустическом поле // Вестн. Новосиб. гос. ун-та, Серия: Физика. 2010. Т. 5, вып. 2. С. 28–42.
Kozlov V. V., Grek G. R., Litvinenko Yu. A., Kozlov G. V., Litvinenko M. V. Subsonic Round and Plane Jets in the Transversal Acoustic Field. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2010, vol. 5, no. 2, p. 28–42. (in Russ.)
3. Грек Г. Р., Катасонов М. М., Козлов В. В., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г. Особенности горения пропана в круглой и плоской макро- и микроструе в по-

перечном акустическом поле при малых числах Рейнольдса // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2013. Т. 8, вып. 3. С. 98–120.

Grekh G. R., Katasonov M. M., Kozlov V. V., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. Features of the Propane Combustion in the Round and Plane Macro- and Micro-Jet in a Transverse Acoustic Field at the Small Reynolds Number. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2013, vol. 8, no. 3, p. 98–120. (in Russ.)

4. **Козлов В. В., Грек Г. Р., Коробейничев О. П., Литвиненко Ю. А., Шмаков А. Г.** Особенности горения водорода в круглой и плоской струе в поперечном акустическом поле и их сравнение с результатами горения пропана в тех же условиях // Вестн. Новосиб. гос. ун-та. Серия: Физика. 2014. Т. 9, вып. 1. С. 79–86.

Kozlov V. V., Grekh G. R., Korobeinichev O. P., Litvinenko Yu. A., Shmakov A. G. The Features of Hydrogen Combustion in Round and Plane Microjet in the Transverse Acoustic Field, and Comparison with the Results Propane Combustion. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2014, vol. 9, no. 1, p. 79–86. (in Russ.)

5. **Леманов В. В., Терехов В. И., Шаров К. А., Шумейко А. А.** Экспериментальное исследование затопленных струй при низких числах Рейнольдса // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39, вып. 9. С. 34–40.

Lemanov V. V., Terekhov V. I., Sharov K. A., Shumeiko A. A. An experimental study of submerged jets at low Reynolds numbers. *Technical Physics Letters*, 2013, vol. 39, no. 5, p. 421–423.

6. **Yakovenko S. N.** Modeling of plane jet at moderate Reynolds numbers. *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1893, issue 1, paper no. 030101, 5 p.

7. **Копьев В. Ф., Остриков Н. Н., Зайцев М. Ю., Чернышев С. А.** Устройство и способ воздействия на вихревые структуры в турбулентной воздушной струе. Патент 2357109 Рос. Федерация. № 2007141384/11; заявл. 07.11.2007; опубл. 27.05.2009. 7 с.

Kopiev V. F., Ostrikov N. N., Zaitsev M. Yu., Chernushev S. A. RU Patent 2357109 C1 (27 May 2009). (in Russ.)

8. **Gogineni S., Shih C.** Experimental investigation of the unsteady structure of a transitional plane wall jet. *Exp. Fluids*, 1997, vol. 23, p. 121–129.

9. **Лойцянский Л. Г.** Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003. 840 с.

Loitsyansky L. G. Mechanics of Liquids and Gases. Moscow, Drofa Publ., 2003, 840 p. (in Russ.)

10. **Moukalled F., Mangani L., Darwish M.** The finite volume method in computational fluid dynamics: An advanced introduction with OpenFOAM® and Matlab®. Springer, 2016, 791 p.

11. **Курбацкий А. Ф., Яковенко С. Н.** Численное исследование турбулентного течения вокруг двумерного препятствия в пограничном слое // Теплофизика и аэромеханика. 1996. Т. 3, № 2. С. 145–163.

Kurbatskii A. F., Yakovenko S. N. Numerical investigation of a turbulent flow around a two-dimensional obstacle in the boundary layer. *Thermophysics and Aeromechanics*, 1996, vol. 3, no. 2, p. 137–155.

12. **Козлов Г. В., Грек Г. Р., Сорокин А. М., Литвиненко Ю. А.** Влияние начальных условий на срезе сопла на структуру течения и устойчивость плоской струи // Вестн. Новосиб. гос. ун-та, Серия: Физика. 2008. Т. 3, вып. 3. С. 14–33.

Kozlov G. V., Grekh G. P., Sorokin A. M., Litvinenko Yu. A. Influence of Initial Conditions at Nozzle Section on Flow Structure and Instability of Plane Jet. *Vestnik NSU. Series: Physics*, 2008, vol. 3, no. 3, p. 14–33. (in Russ.)

Материал поступил в редколлегию

Received

05.06.2018

Сведения об авторах / Information about the Authors

Шевченко Антон Константинович, лаборант, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Anton K. Shevchenko, Laboratory Assistant, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

a.shevchenko@live.com

Яковенко Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (ул. Институтская, 4/1, Новосибирск, 630090, Россия)

Sergey N. Yakovenko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Associate Professor, Senior Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics SB RAS (4/1 Institutskaya Str., Novosibirsk, 630090, Russian Federation)

yakovenk@itam.nsc.ru