

## Моделирование струй при небольшом числе Рейнольдса для управления потоком в задачах энергетики и транспорта

### Состав коллектива:

Шевченко Антон Константинович (магистрант 2-го года ФЛА НГТУ, дипломная работа)

Яковенко Сергей Николаевич (с.н.с. ИТПМ СО РАН, д.ф.-м.н., доцент) – науч. руководитель

**1. Современное состояние проблемы и мотивация работы.** В последнее время в связи с миниатюризацией технических устройств наблюдается повышенное внимание к микроструйным течениям (напр., [1–4]), связанное с развитием микро-электромеханических систем, водородной энергетики и других отраслей науки и промышленности, где внимание уделяется вопросам струйного истечения из малоразмерных устройств. Возникает потребность в методах управления этими процессами. В физических экспериментах [1] получена зависимость протяженности ламинарного участка струи перед ее переходом к турбулентности от числа Рейнольдса, и показаны соответствующие картины истечения микроструй. В [2] установлено, что развитие плоских струй связано с механизмом синусоидальной неустойчивости. В [3] проанализирована зависимость координаты ламинарно-турбулентного перехода затопленной струи от числа Рейнольдса, аналогичная результатам из [1]. В [4] получены предварительные результаты расчета микроструй в виде стационарных решений двумерных уравнений движения. Цель настоящей работы – выполнить компьютерное моделирование развития неустойчивости плоской затопленной струи при небольших числах Рейнольдса и выяснить, согласуются ли полученные в физических и численных экспериментах результаты.

### 2. Постановка численного эксперимента, используемые алгоритмы.

Использованы нестационарные уравнения неразрывности и Навье–Стокса для несжимаемой среды в декартовых координатах  $(x, y)$ . Расчеты проведены в пакете OpenFOAM для плоской струи воздуха, вытекающей из узкой щели. Выбраны числа Рейнольдса  $Re = u_0 h / \nu = 32, 80, 160$ , соответствующие высоте щели  $h = 0,2$  мм (как в [1, 2]) и начальной скорости  $u_0 = 2,4, 6, 12$  м/с струи на выходе из щели, где  $\nu$  – кинематическая вязкость. Параметры схемы сетки и границ области расчета приведены в табл. 1, 2. Начальные условия соответствуют покоящейся среде (кроме части входного сечения, Inlet, соответствующей выходу из щели). Неравномерная расчетная сетка содержала  $268 \times 394$  ячеек. Параллельные вычисления с количеством шагов  $\Delta t$  около  $10^5$  занимали в среднем четыре часа на 16 процессорных ядрах кластера ИВЦ НГУ.

Расчетная схема	$\Delta t(u_0/h)$	$L_x/h$	$L_y/h$	$\Delta x_{\min}/h = \Delta y_{\min}/h$	$\alpha_x$	$\alpha_y$
Gauss Linear	0,0144	300	200	0,025	1,013	1,05

Таблица 1: параметры расчета,  $\Delta t$  – шаг по времени,  $L_x, L_y$  – длина и ширина расчетной области,  $\Delta x_{\min}, \Delta y_{\min}$  – минимальные размеры ячейки,  $\alpha_x, \alpha_y$  – коэффициенты расширения сетки по геометрической прогрессии при  $x > 0, |y - L_y/2| > h$ .

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

Таблица 2: граничные условия (см. схему области на рис.

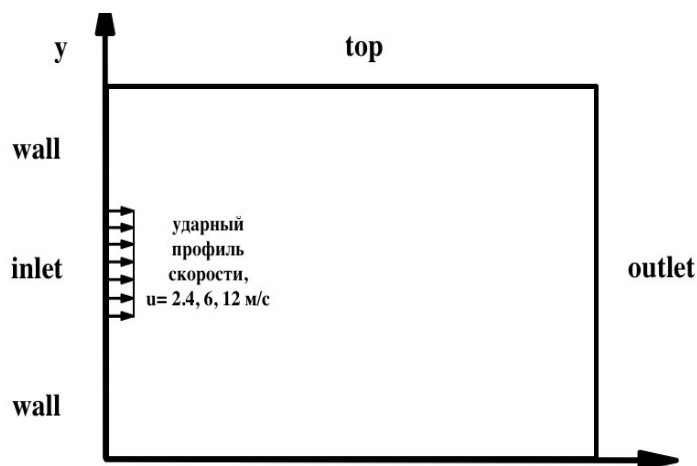


Рис. 1. Схема границ области расчета

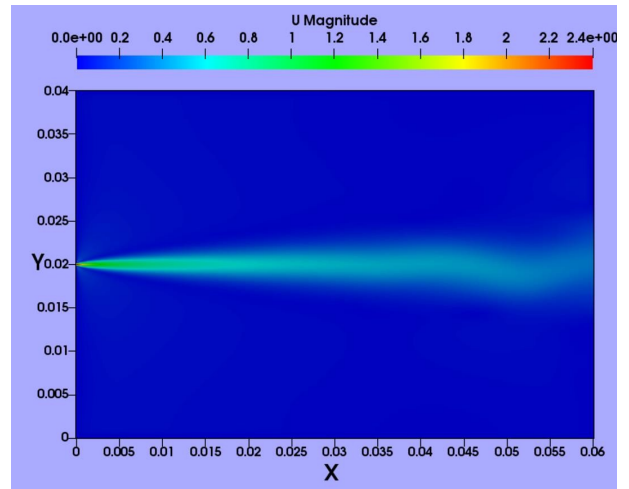
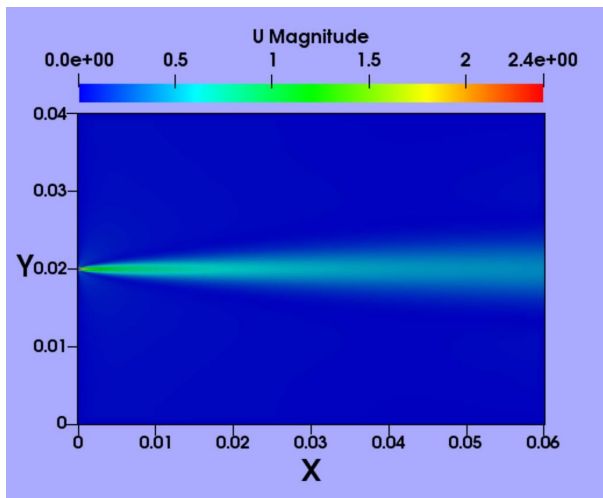
### 3. Результаты расчетов, анализ и сравнение с опытными данными.

Изучено развитие возмущений, происходящего с ростом  $Re$  из-за снижения вклада молекулярной вязкости в уравнении Навье–Стокса по сравнению с конвективным членом, ответственным за рост неустойчивости. Найденные результаты (рис. 2) сопоставлены с данными лабораторных экспериментов [1, 2]. Характер течения при  $Re = 32$  (рис. 2а) аналогичен потоку в [1] при  $16 \leq Re \leq 48$ , и заметно расхождение при  $Re > 48$  (рис. 2б,в; рис. 3а). Струя, полученная в расчете, имеет три участка: первый – «спокойное» ламинарное течение; второй характеризуется асимметричной неустойчивостью синусоидального вида; на третьем струя разрушается, (переход к турбулентности). В [1] второй участок не наблюдался, и измерено расстояние  $L$  от выхода струи из щели до точки разрушения ламинарного режима при различных числах  $Re$ . С другой стороны, полученные в вычислениях картины течения на переходном (втором) участке соответствуют осциллирующему поведению струи, обнаруженному в [2, 3].

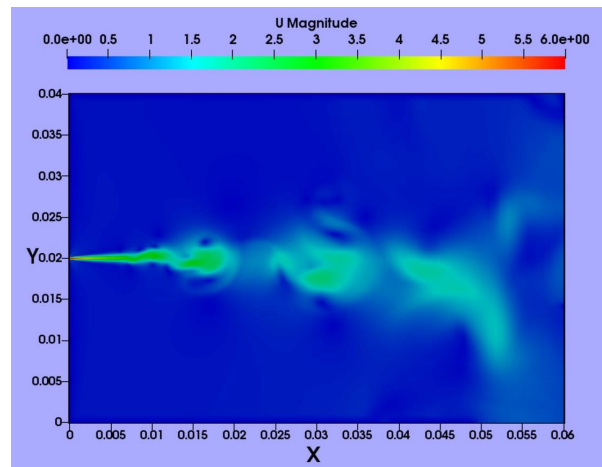
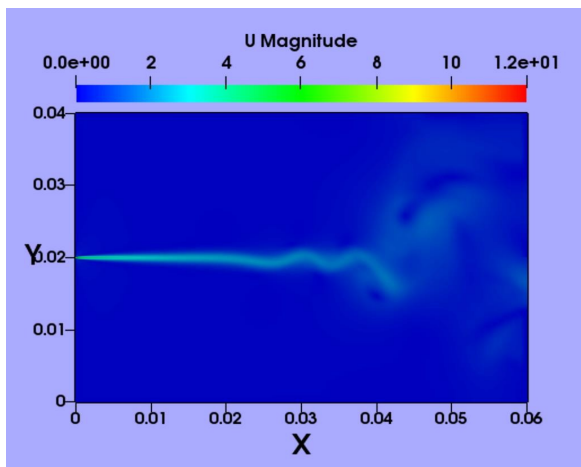
В физическом эксперименте имеют место возмущения различной природы, которые сообщаются потоку и провоцируют развитие неустойчивости и турбулентности. Можно задать подобные им возмущения небольшим искажением входного профиля скорости вдоль оси  $x$  (рис. 2, справа). Ввод случайных возмущений малой амплитуды выполнен в OpenFoam с помощью встроенного граничного условия `turbulentInlet`. После этого поведение струи для  $Re = 32$  показывает синусоидальную неустойчивость (рис. 2а): при этом, по-видимому, снижается критическое число Рейнольдса, при котором наблюдается второй участок. Участки 1 и 2 для струй при  $Re = 80, 160$  значительно сократились после ввода возмущений (рис. 2б,в).

Зависимость протяженности ламинарного участка струи  $L/d$  (где  $d$  – высота щели) от числа Рейнольдса, полученная в [1, 3] и в настоящей работе, приведена на рис. 3. Совместное влияние численной неустойчивости и случайных возмущений в расчетах оказалось больше, чем для возмущений в [1] и [3], данные которых, в свою очередь, отличаются примерно в два раза друг от друга. Уменьшение амплитуды случайных возмущений в расчетах приводит к росту  $L/d$ , с наилучшим совпадением для  $Re = 80$  с данными [1].

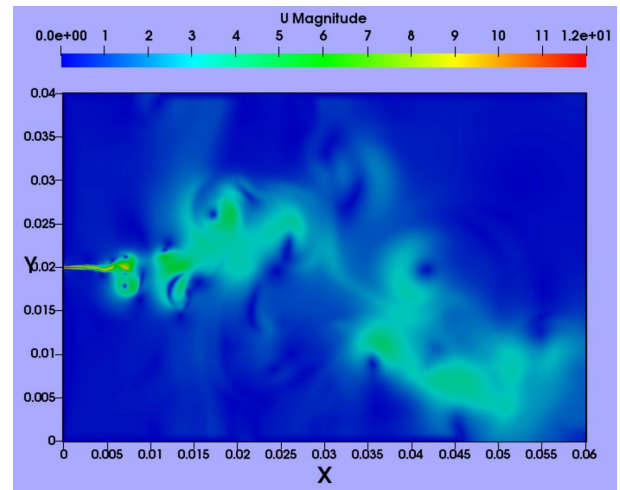
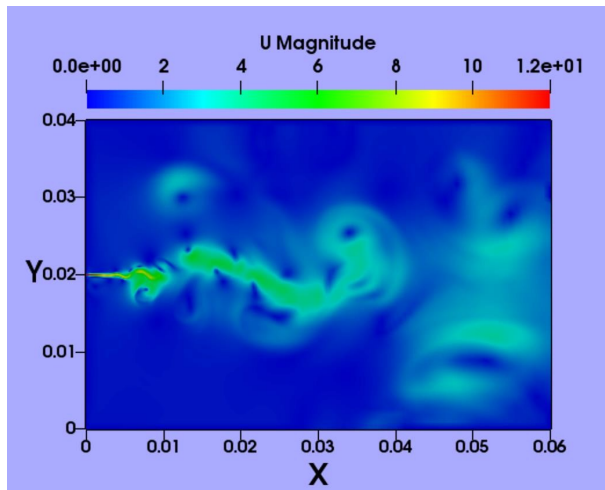
Можно оценить длину волны колебаний, которые соответствуют выявленному эффекту синусоидальной неустойчивости. Изолинии вертикальной компоненты скорости показывают знакопеременный характер распределений  $v(x,y)$  вдоль оси  $x$ . В табл. 3 приведены расстояния между сечениями с соседними максимумами (минимумами) распределений  $v(x,y)$  как длины волн колебаний  $\lambda$  и характерные скорости осцилляций по вертикали  $v^*$  (найденные из среднеквадратичной скорости), откуда получается характерная частота колебаний  $f$ . С ростом  $Re$  второй участок с синусоидальной неустойчивостью сдвигается к щели, длина волны падает, а скорость осцилляций возрастает, приводя к резкому росту частоты «самовозбуждения» струи.



(a)



(б)



(в)

Рис. 2. Изолинии амплитуды вектора скорости (м/с) на плоскости координат (в метрах) при  $Re = 32$  (а),  $80$  (б),  $160$  (в); слева – без возмущений, справа – после ввода случайных возмущений

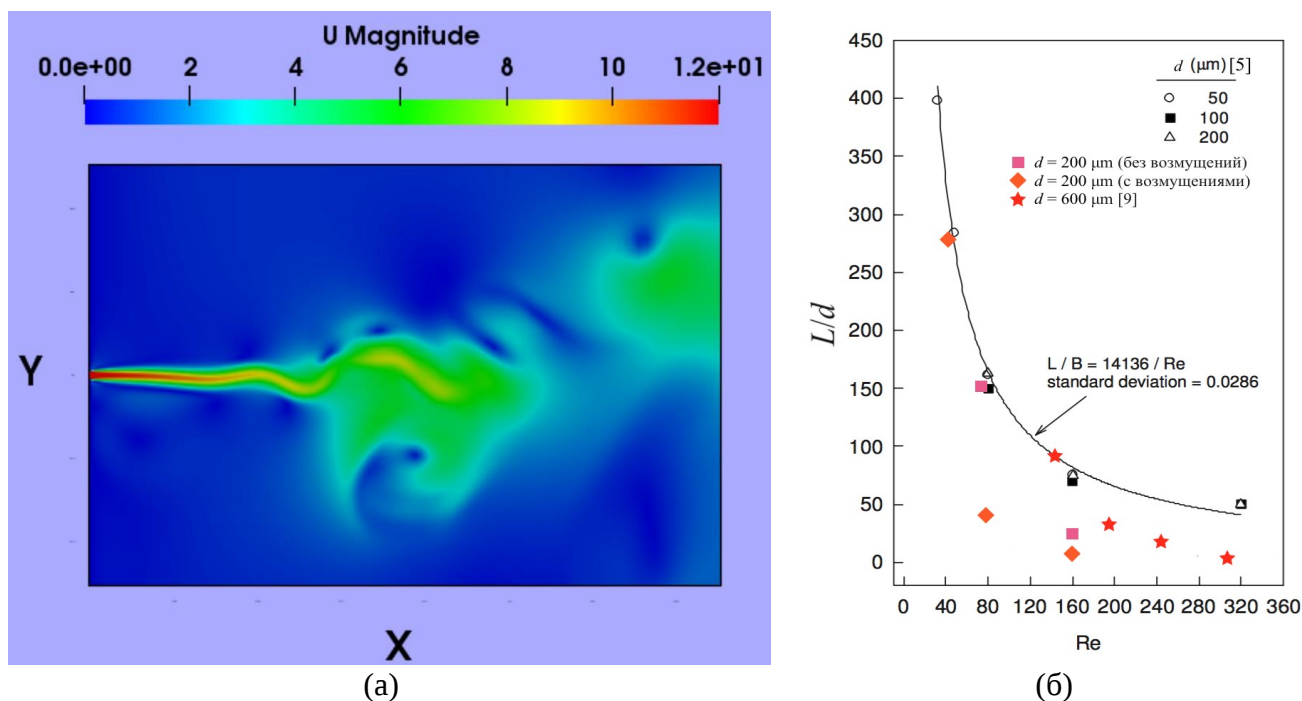


Рис. 3. (а) Картина течения при  $Re = 160$  (рис. 2в, слева) увеличена для иллюстрации различных участков струи; (б) положение точки ламинарно-турбулентного перехода в зависимости от  $Re$

Число Рейнольдса	Входная скорость струи	$\lambda$ , мм	$\lambda/h$	$v^*$ , 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	1500

Таблица 3: оценка характеристик колебаний синусоидальной неустойчивости

**Эффект от использования кластера в достижении целей работы.** Применение кластера ИВЦ НГУ для нестационарных расчетов микроструй, требующих мелких сеток и больших размеров области, способствовало улучшению точности моделирования. Результаты представлены на трех конференциях и в статье, направленной в Сибирский физический журнал.

### Список литературы

1. Gau C., Shen C. H., Wang Z. B. Peculiar phenomenon of micro-free-jet flow // Phys. Fluids. 2009. Vol. 21. Paper # 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.
3. 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.
4. Yakovenko S.N. Modeling of plane jet at moderate Reynolds numbers // AIP Conference Proceedings. 2017. Vol. 1893, Issue 1. Paper # 030101. 5 p.