

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЙ ГОМОГЕННЫХ И ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

А.К. Шевченко¹, С.В. Стрижак², С.Н. Яковенко¹

¹*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО
РАН, 630090, Новосибирск, Россия*

²*Институт системного программирования им. В.П. Иванникова РАН, 109004,
Москва*

Аннотация. Затопленная струя исследована путем численного решения уравнений Навье–Стокса при различных числах Рейнольдса Re . Изучено влияние Re на характер течения и положение перехода к турбулентности, при задании случайных возмущений на входе. Сделаны оценки длины и частоты волны колебаний синусоидальной неустойчивости, самовозбуждаемой в струе. Проведено с помощью методов URANS и VOF моделирование струи газа со дна моря, оценено ее действие на вводимое тело.

Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020 годы (проект АААА-А17-117030610128-8).

Введение. Моделирование струй актуально в задачах энергетики и транспорта при управлении течением из различных сопел и процессами горения, для снижения шума авиадвигателей и экономии топлива летательных аппаратов, для изучения струйного истечения в случае утечек нефти и газа со дна моря при освоении месторождений и т.д.

В работе рассматриваются затопленные струи при различных числах Рейнольдса Re ($= u_0 h / \nu$), где u_0 – средняя скорость течения на входе в струю из плоской щели высотой h (диаметре отверстия) (см., напр., [1-4]). Численное решение уравнений неразрывности и Навье–Стокса получено на основе OpenFOAM, при помощи метода конечных объемов и трех различных решателей для несжимаемых, сжимаемых и многофазных течений.

Изучено влияние изменения входного профиля скорости, числа Re на характер течения и интегральные характеристики поля скорости – точку перехода от ламинарного к турбулентному режиму течения, угол расширения струи при этом переходе, максимум скорости в поперечном сечении, характерные толщины струи. Обсуждаются эффекты ввода возмущений различной амплитуды, сжимаемости, перепада плотности истекающего газа и окружающей среды, изменения формы входного отверстия на структуру потока.

Результаты моделирования. На предварительных этапах для получения решения, независимого от деталей численной реализации, изучалось влияние шагов по координатам и времени, размеров области расчета, граничных условий, разностных схем на результаты с учетом критериев сравнения решений [5] и интегральных характеристик.

В основных расчетах получены мгновенные и осредненные по времени распределения скорости при различных Re (рис. 1, 2а). Вычисления показывают [4] три характерных участка струи: ламинарный, переходный с неустойчивостью синусоидального вида, турбулентный. Длины первых двух участков падают с ростом амплитуды случайных возмущений входного профиля скорости и числа Re , что соответствует данным опытов [1-3].

Переход к турбулентности начинается в сечении $x = L$, где угол расширения струи резко возрастает (красная линия на рис. 2а). Найдем в каждом сечении (рис. 2) максимум средней скорости $u_m(x)$ и характерную высоту струи, например, $h_{0,05}(x) = y_2 - y_1$, т.е. разность поперечных координат в верхней и нижней частях струи, где горизонтальная средняя скорость равна $0,05u_m$. При переходе от ламинарного к турбулентному режиму $u_m(x)$ затухает по степенному закону ($x^{-5/6}$), а $h_{0,05}(x)$ растет как $x^{7/4}$. Из рис. 1, 2 следует оценка

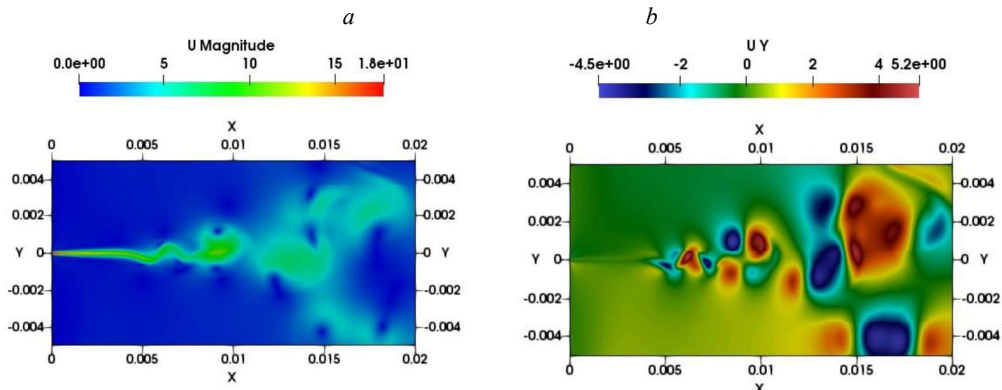


Рис. 1. Амплитуда $(u^2 + v^2)^{1/2}$ (а) и вертикальная компонента $v(x,y)$ (б) скорости (м/с) на плоскости координат (м) в плоской струе при $Re = 160$ с параболическим профилем скорости на входе.

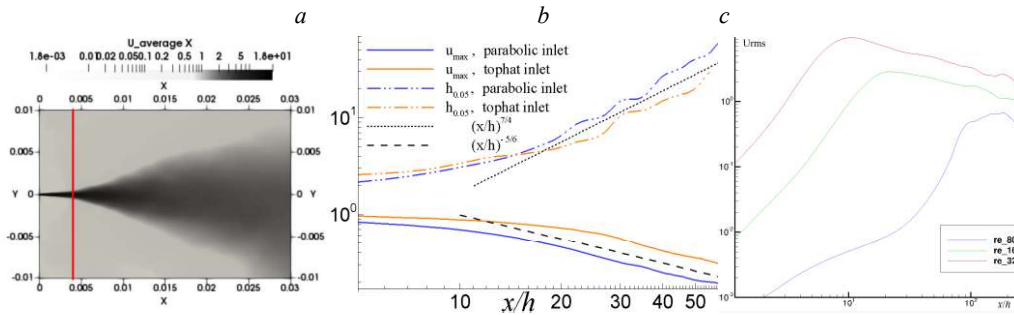


Рис. 2. Изолинии $u(x,y)$ после осреднения по промежутку $T = t(u_0/h) = 5 \cdot 10^4$ в струе с теми же параметрами, что на рис. 1 (а); максимум скорости и характерная высота струи для параболического и «ударного» профилей скорости на входе (б); уровень пульсаций скорости в центре струи (с).

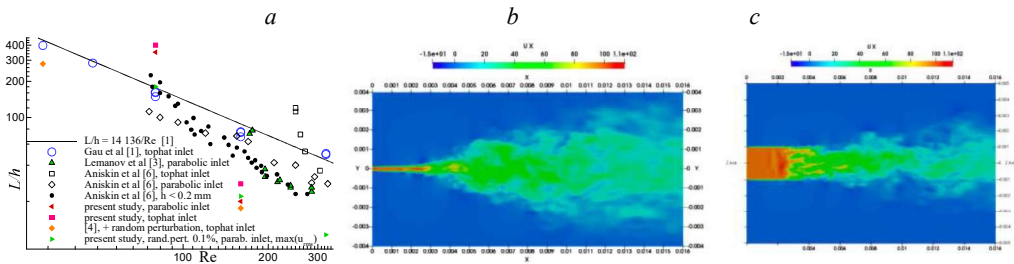


Рис. 3. Зависимость $L(Re)$ в [1, 3, 4, 6] (а); трехмерная струя, изолинии u – вид сбоку (б), сверху (с).

$L \approx 20h$. При $x > L$ возникают поперечные колебания синусоидальной неустойчивости, обнаруженные и в опытах [2, 3] с плоской струей. Положение ламинарно-турбулентного перехода также можно определить как координату x сечения, где среднеквадратичные пульсации горизонтальной компоненты вектора скорости достигают максимальных значений (рис. 2с, 3а). Уменьшение амплитуды случайных возмущений приводит к росту L в двумерных расчетах [4], с совпадением для $Re = 80$ с данными [1] (рис. 3а). К росту L может также приводить переход от плоской струи в [4] к псевдоплоской в [1-3], где истечение происходит из отверстия конечной ширины $W \gg h$. Особенности развития прямоугольной струи ($Re = 1280$, $W/h = 20$) показаны на рис. 3(б,с).

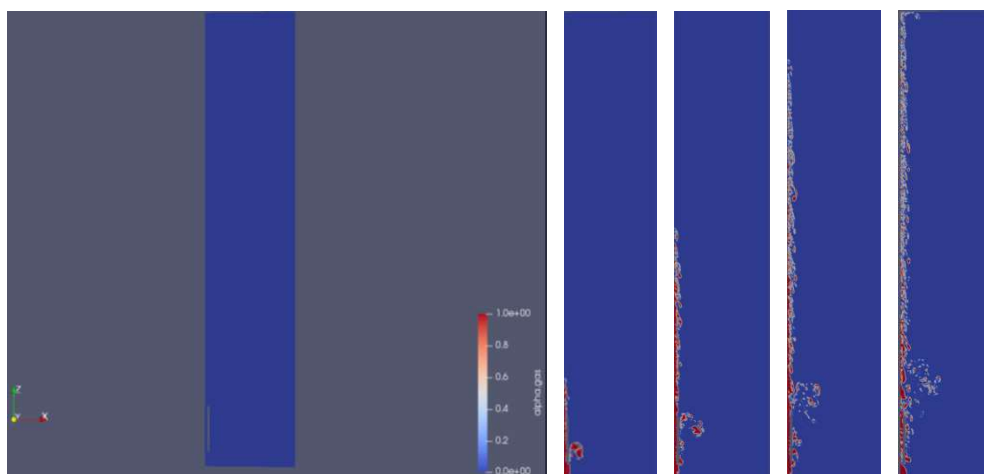


Рис. 4. Объемная фракция газа ($\alpha = 1$, красным) в жидкости ($\alpha = 0$, синим); $t = 0; 1,0; 2,0; 3,0; 3,8$ с.

Длины волн λ колебаний синусоидальной неустойчивости оценивались как расстояния между сечениями с соседними максимумами v (рис. 1). Получена величина λ/h от 10 до 100 для $Re = 80$ и 160 , возрастающая вниз по течению и падающая с ростом Re и амплитуды возмущений за счет сдвига участка с синусоидальной неустойчивостью ближе ко входу [4]. С другой стороны, с ростом Re и амплитуды возмущений характерные скорости поперечных осцилляций v^* (среднеквадратичные значения v) увеличиваются и приводят к резкому росту частоты «самовозбуждения» струи $f (\approx v^*/\lambda)$ от 40 до 1500 Гц.

Также проведен расчет истечения струи метана в затопленное пространство воды в области высотой 30 м и диаметром 4,5 м. В центре дна области находился источник газа из круглого отверстия диаметром 0,3 м, с заданным расходом $Q = 3$ или 5×10^6 м³ в сутки, над ним на высоте 1 м от дна – заглушка (толстый полый цилиндр диаметром 0,6 м и высотой 3 м, с центральным отверстием диаметром 0,3 м). Для учета поверхности раздела сред и турбулентности применены подходы VOF и URANS с $k-\omega$ SST моделью. В силу симметрии осредненного течения рассмотрена половина струи. Получены распределения объемной фракции газа α (рис. 4), скорости, давления, действующие на цилиндр силы в моменты времени $t \leq 3,8$ с. Скорость газа при истечении достигала около 70 м/с. Максимальное число Рейнольдса для истекающей струи составило $Re = 1,5 \times 10^5$.

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. НГУ, Сер.: Физ. 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. 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.
5. 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.
6. Aniskin V.M., Lemanov V.V., Maslov N.A., Mukhin K.A., Terekhov V.I., Sharov K.A. An experimental study of the flow of subsonic flat mini and micro air jets // Tech. Phys. Lett. 2015. Vol. 41, No. 1. P. 46–49.