

Воропаев Г.А. д.ф.-м.н., проф., Загуменный Я.В. к.ф.-м.н., ст.н.с.

Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев, Украина

СТРУКТУРА НЕСТАЦИОНАРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ НА ДЕФОРМИРУЮЩЕЙСЯ ПОВЕРХНОСТИ

Работа посвящена вопросам управления структурой собственных возмущений в пограничном слое и, как следствие, интегральными параметрами обтекаемых поверхностей. Путем изменения параметров задающего генератора локальных возмущений на обтекаемой поверхности возможно управлять последовательностью трансформации, структурой, интенсивностью, масштабами и временем существования трехмерных вихревых структур в пограничном слое. Нелинейный анализ развития локальных регулярных возмущений в терминах длины волны, фазовой скорости и амплитуды показал обязательный переход к нерегулярным возмущениям через последовательность когерентных трехмерных продольных вихревых образований при переходных числах Рейнольдса. Приведенные результаты демонстрируют трансформацию плоских возмущений пограничного слоя в трехмерные вихревые структуры с явно выраженной продольной компонентой завихренности. Получающиеся когерентные вихревые структуры, как результат нелинейного этапа перехода, позволяют сделать шаг в направлении понимания методологии кинематического управления структурой пристенных течений.

Ключевые слова: деформирующаяся поверхность, бегущая волна, пограничный слой, вихревая структура, прямое численное моделирование

Введение

Структура собственных возмущений в пограничном слое даже плоской гладкой поверхности многолика – от плоской волны Толлмина-Шлихтинга до сложных трехмерных вихревых образований. Все эти возмущения поодиночке либо в различных сочетаниях отвечают за последовательность этапов перехода к турбулентности [1]. Это обуславливает существование разнообразных методов управления структурой собственных возмущений в пограничном слое, которые позволяют изменять интегральные параметры обтекаемых поверхностей [2].

Анализ развития возмущений в пристенных течениях на основании решения нелинейной нестационарной системы уравнений Навье-Стокса в плоской постановке показал, что поведение развития возмущений в потоке очень слабо отличается от структуры устойчивых и нейтральных возмущений, предсказанных линейной теорией устойчивости, несмотря на учет, как нелинейности, так и непараллельности рассматриваемого течения [3]. Возмущения с параметрами близкими к параметрам волны Толлмина-Шлихтинга распространяются в пограничном слое, не трансформируясь, в достаточно большом диапазоне величин амплитуд, которые нельзя считать малыми, тем более бесконечно малыми. Структура амплитуд возмущений компонент скорости, завихренности и давлений подобна классическим представлениям теории устойчивости пограничного слоя [4].

Принципиально отличаются результаты, получаемые на основании решения той же задачи, но в трехмерной постановке. Начальное возмущение в виде плоской волны либо затухает, сохраняя вид плоской волны, либо распространяется вниз по потоку, но обязательно трансформируется в сложную вихревую структуру, проходя этап образования λ -образных структур [5].

Данная работа посвящена численному исследованию формирования и трансформации вынужденных возмущений в пограничном слое на основании прямого численного решения трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса. Изучается возможность управления структурой, интенсивностью, пространственно-временными масштабами, временем существования и сценарием трансформации трехмерных вихревых структур в пограничном слое путем изменения параметров задающего генератора локальных возмущений на обтекаемой поверхности.

Постановка задачи и метод решения

Исследуются процессы пространственно-временного формирования и развития возмущений скорости и давления в сдвиговом слое на обтекаемой поверхности с некоторой областью конечной длины и ширины, деформирующейся по закону бегущей волны и расположенной на определенном расстоянии от ударного входа (рис.1). Для определения волновой и вихревой структуры течения на обтекаемой поверхности с локально деформирующейся вставкой решается классическая система трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса и уравнение неразрывности для вязкой несжимаемой жидкости с граничными условиями невозмущенного натекающего потока и условиями прилипания на обтекаемой поверхности:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{U})\mathbf{U} + \frac{1}{\rho} \nabla P - \frac{1}{\text{Re}} \Delta \mathbf{U} = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{U} = 0, \quad (1)$$

$$\mathbf{U}|_{x,h,z \rightarrow \pm\infty} = \{U_0, 0, 0\}, \quad \mathbf{U}|_S = \left\{ \frac{\partial \xi_x}{\partial t}, \frac{\partial \xi_y}{\partial t}, \frac{\partial \xi_z}{\partial t} \right\}, \quad (2)$$

где $\mathbf{U} = \{U, V, W\}$, P , ρ , ν , U_0 , $\text{Re}_\delta = U_0 \delta / \nu$ – вектор скорости, давление, плотность, кинематическая вязкость жидкости, скорость набегающего потока и число Рейнольдса, определенные по толщине пограничного слоя δ , соответственно. $\vec{\xi} = \{\xi_x, \xi_y, \xi_z\}$ – вектор перемещения поверхности обтекаемого тела.

В работе рассмотрены вынужденные периодические возмущения на обтекаемой поверхности, задаваемые в форме плоской бегущей волны, распространяющейся в направлении набегающего потока, с переменной амплитудой в поперечном направлении: $\xi_y = A(z) \cdot \sin(2\pi/\lambda_x (x - C_{ph} \cdot t))$, где $A(z) = A_0 \sin(2\pi/\lambda_z \cdot z)$, λ_x и $C_{ph} = \lambda_x \cdot f$ – амплитуда, длина и фазовая скорость генерируемой волны в продольном направлении, соответственно.

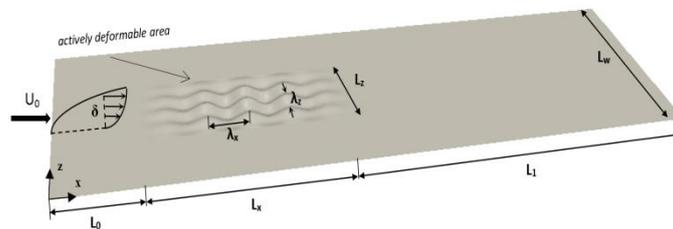


Рис. 1. Схема рассматриваемой задачи

Изучается изменяемость возмущенного поля течения в зависимости от значений безразмерных параметров бегущих длинных волн, которые схематически указаны на Рис.1: $A/\delta = 0.01 \div 0.15$, $\lambda_x/\lambda_{TS} = 0.5 \div 3.0$, $C_{ph}/U_0 = 0.1 \div 0.9$, $L_x/L = 0.05 \div 0.7$, $L_z/L_w = 0.25$, $\text{Re}_\delta \approx 10^3$ ($U_0 = 0.1$ м/с), где $\lambda_{TS} \approx 6\delta$ – характерная длина волны Толлмина-Шлихтинга.

Численное моделирование проводится методом конечных объемов на базе решателей собственной разработки открытого пакета OpenFOAM с использованием объектно-ориентированного языка программирования C++. Расчетная область представляет собой прямоугольный параллелепипед, на входной вертикальной грани которого задается скорость невозмущенного потока жидкости, на выходной – «мягкие» граничные условия, а на верхней и боковых гранях – условия «подвижной крышки» с проскальзыванием. Реальное деформирование части обтекаемой поверхности реализовано путем включения в решатель пакета OpenFOAM библиотек динамических сеток собственной разработки, позволяющих в расчетном режиме автоматически перестраивать сетку по всей расчетной области в соответствии с произвольно задаваемым законом изменения геометрии деформируемой поверхности путем решения на каждом временном слое уравнения Лапласа для узлов

расчетной сетки. Развиваемая численная методика увеличивает точность проводимых расчетов течений на деформируемых поверхностях за счет реального учета искривления поверхности в отличие от классических подходов, когда граничные условия на деформируемой границе сносятся на невозмущенную поверхность.

Расчеты задачи проводились в параллельном режиме с применением метода декомпозиции расчетной области на базе суперкомпьютерных систем. Обработка и визуализация результатов расчетов выполнялась с использованием стандартных утилит пакета OpenFOAM, графического интерфейса ParaView и пакета прикладных программ для численного анализа и научной графики Origin.

Результаты расчетов

Результаты расчетов показывают, что локальный источник возмущений на обтекаемой поверхности, изначально генерирующий плоские волновые возмущения, по мере их развития вниз по потоку достаточно быстро создает характерные Λ -структуры с последующим образованием продольно ориентированных вихревых структур. Эти структуры по мере дальнейшего развития вниз по потоку теряют четкость своих форм и постепенно разрушаются, приводя к потере изначально детерминированного характера возмущений и хаотизации течения вниз по потоку (рис.2, а, в), в зависимости от изменяемости амплитуды по размаху плоской волны. При этом деформируются касательные напряжения трения на поверхности, отражающие механизм перераспределения энергии по толщине пограничного слоя и скорость нарастания их вниз по потоку, что и определяет нелинейный механизм процесса трансформации масштабов и интенсивности вихревых структур в пограничном слое (рис. 2, б; г).

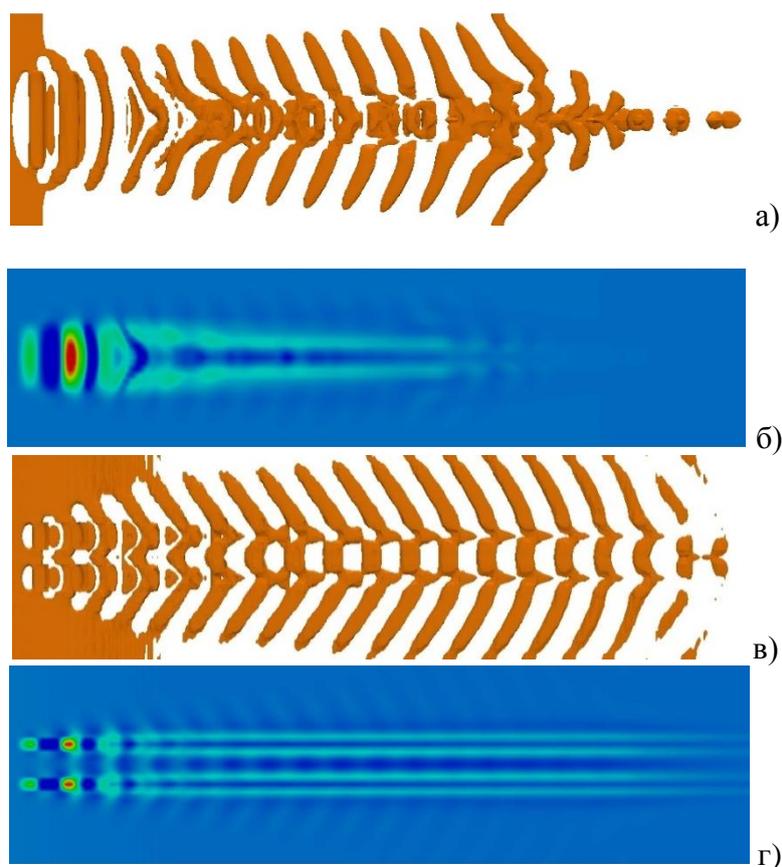


Рис. 2. Трехмерная вихревая структура течения (а, в) и соответствующие распределения на обтекаемой поверхности напряжения сдвига (б, г):

$$Re_\delta \approx 10^3, A/\delta \approx 0.1, C_{ph}/U_0 = 0.5, \lambda_x/\lambda_{TS} \approx 1.5, \lambda_z/\lambda_{TS} \approx 2.7 \text{ (а, б)}, \lambda_z/\lambda_{TS} \approx 0.88 \text{ (в, г)}$$

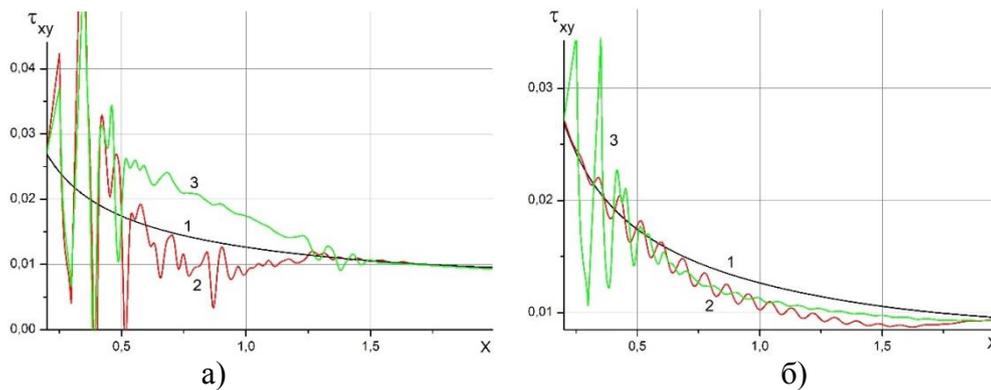


Рис. 3. Изменение величины напряжения сдвига на локально деформируемой поверхности (2, 3) в сравнении с гладкой жесткой пластиной (1): $Re_\delta \approx 10^3$, $A/\delta \approx 0.1$, $C_{ph}/U_0 = 0.5$,

$$\lambda_x/\lambda_{TS} \approx 1.5, \lambda_z/\lambda_{TS} \approx 2.7 \text{ (а)}, \lambda_z/\lambda_{TS} \approx 0.88 \text{ (б)}$$

В итоге можно утверждать, что плоская волна переменной амплитуды по фронту волны генерирует продольные вихревые структуры, поперечный размер которых пропорционален λ_z , а зона устойчивости обратно пропорциональна λ_z , что отражается в заметном уменьшении напряжении трения на поверхности с уменьшением длины поперечной волны (рис.3). Полученный результат позволяет сделать важный шаг в направлении понимания методологии кинематического управления структурой пристенных течений с помощью структурированных обтекаемых поверхностей.

Выводы

Предложены алгоритмы решения трехмерных нестационарных задач обтекания тел с деформирующейся поверхностью на основе прямого численного моделирования с использованием программ и библиотек динамических расчетных сеток собственной разработки открытого пакета OpenFOAM. Установлено, что локально деформирующаяся область обтекаемой поверхности в форме плоской бегущей волны при определенных значениях длины волны и фазовой скорости приводит к формированию вниз по потоку структуры устойчивых трехмерных вихревых образований с явно выраженной продольной компонентой завихренности. Переменность амплитуды по фронту плоской волны генерирует продольные вихревые структуры с пропорциональными масштабами, что отражается в заметном уменьшении напряжении трения на поверхности.

Разработанный метод расчета дает возможность выбора параметров деформирующейся обтекаемой поверхности для создания когерентных вихревых структур в ламинарном пограничном слое оптимальной интенсивности и масштабов с целью снижения сопротивления трения и интенсификации теплообмена.

Список литературы

1. *Бойко А.В.* Возникновение турбулентности в пристенных течениях / А.В. Бойко, Г.Р. Грек, А.В. Довгаль, В.В. Козлов. – Новосибирск: Наука, 1999. – 328 с.
2. *Wang J.* Flow control techniques and applications / J. Wang, L. Feng. – Flow Control Techniques and Applications. – Cambridge: Cambridge University Press, 2018.
3. *Воропаев Г. А.* Численное моделирование взаимодействия локальных возмущений пограничного слоя с деформирующейся поверхностью / Г. А. Воропаев, Я. В. Загуменный // Вестник Донецкого Университета, Сер.А: Естественные науки. – 2009. – Вып.1. – С. 154–156.
4. *Voropaev G.* Wave and vortex structure of transitional boundary layer over deformable surface / G. Voropaev, Ia. Zagumennyi // Physica Scripta. – 2010. – T142. – 014010.
5. *Voropaev G.A.* Boundary layer perturbations generated by locally deformable surface / G.A. Voropaev, Ia.V. Zagumennyi // Proc. 7th International Conference on Vortex Flows and Vortex Models, 19–22 September 2016, Rostock, Germany, P. 91–94.