## ДИНАМИКА И ТРЕХМЕРНЫЕ ВТОРИЧНЫЕ ТЕЧЕНИЯ В ТУРБУЛЕНТНОЙ ЩЕЛЕВОЙ СТРУЕ

## Мулляджанов Р.И.<sup>1,2</sup>

 <sup>1</sup> Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, 630090, Россия, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 1
<sup>2</sup> Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Статистические характеристики пристенной турбулентности во многом определяются динамикой когеретных вихревых стурктур. Особый класс крупномасштабных когерентных структур проявляется в щелевых струйных течениях, когда струйный поток ограничен двумя узкими параллельными стенками. Такие течения обычно характеризуют как "квазидвумерные" поскольку продольные и поперечные размеры конфигурации много больше расстояния между стенками [1-4].

При некоторых параметрах щелевого течения реализуется известное синусоидальное меандрирование [5-9], вызванное гидродинамической неустойчивости профиля скорости к асимметричной моде возмущения [10]. Меандрирование создает плоские крупномасштабыне вихри. Согласно работе [8], эти вихри, расположенные в шахматном порядке в обоих слоях смешения, двигаются вниз по течению со скоростью в четыре раза ниже, чем локальная осевая скорость струи. Этот режим течения перестает существовать, когда трение о стенки достаточно сильно уменьшает импульс струи достаточно далеко от сопла струи.

Заметные вторичные течения в ближнем поле щелевой струи вызваны взаимодействием слоев смешения и стенок [10, 11]. Поскольку вниз по потоку происходит сильное уменьшение вертикальных турбулентных пульсаций, утверждается, что в дальнем поле реализуется только двумерное течение [5, 6].

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования турбулентной щелевой методом крупных вихрей (Large-eddy струи simulations, LES). Главным объектом изучения являются трехмерные вторичные течения и их эволюция вних по течению. Входные условия соответсвуют развитому турбулентному течению в прямоугольном канале с соотношением сторон  $B : H \approx 10$ , где B – ширина входного канала, Н – расстояние между узкими параллельными стенками. Число Рейнольдса, построенное по Н и среднерасходной скорости W<sub>0</sub> входного канала, равно 10<sup>4</sup>. Стоит отметить, что струя теряет устойчивость на расстоянии 5В от выходного сечения и начинает меандрировать в поперечном направлении. Эти синусоидальные колебания создают крупномасштабные вихри, растующие в слоях смешения. Эти структуры хорошо изучены и подробно описаны в литературе. В данной работе обнаружены длинные продольные вихревые структуры, меандрирующие вместе со струйным потоком, которые проявляются в дальнем поле струи. Вызванные взаимодействием стенок и колебательного движения ядра струи, продольный размер этих вихревых структур может превышать 10Н.



Рис. 1. Рассматриваемая геометрия течения и численного моделирования. Начало декартовой системы координат совпадает с концом входного канала. Две узкие стенки расположены в плоскостях y = 0 и y = H.

Рис. 2а и б демонстрируют мгновенное поле флуктуаций давления при у=0 и вихревые структуры, вызуализированные при помощи различных значений Q-критерия. Отметим, что локальный минимум давления совпадает с вихрями Кельвина-Гельмгольца (КГ). Рис. За показывает их рост и эволюцию вниз по течению. Узкие параллельные стенки сильно влияют на форму вихрей КГ, делая их гантелеобразными, с характерными утолщения около стенок. Этот процесс деформации хорошо согласуется с предполагаемым процессом генерации завихренности [10]. В течение нелинейной фазы развития вихрей КГ можно наблюдать характерные продольные вихревые "перемычки", соединяющие цепочку вихрей в слоях смешения (Рис. 3а). Более детальное рассмотрение вихревой структуры дальнего поля струи на Рис. Зб указывает на наличие продольных вихревых структур, существующих несмотря на ламинаризацию турбулентной струи вниз по течению. Детальное описание этих вихрей, а также упрощенная модель их производства и будет представлена в докладе.

## Список литературы:

 Jirka G.H. Large scale flow structures and mixing processes in shallow flows // J. Hydraul. Res. 2001. 39 (6), 567–573.

- Jirka G.H., Uijttewaal W.S.J. In Shallow Flows (Taylor and Francis, UK, 2004).
- van Heijst G.F., Clercx H.J.H. Studies on quasi-2D turbulence–the effect of boundaries // Fluid Dyn. Res. 2009. 41, 064002.
- 4. Uijttewaal W.S.J. Hydrodynamics of shallow flows: application to rivers // J. Hydraul. Res. 2014 52 (2), 157–172.
- Giger M., Dracos T., Jirka G.H. Entrainment and mixing in plane turbulent jets in shallow water // J. Hydraul. Res. 1991. 29 (5), 615–642.
- Dracos T., Giger M., Jirka G.H. Plane turbulent jets in a bounded fluid layer // J. Fluid Mech. 1992. 241, 587–614.
- 7. Chen D., Jirka G.H. LIF study of plane jet bounded in shallow water layer // J. Hydraul. Engng. 1999. 125 (8), 817–826.



Рис. 2. Мгновенное поле флуктуаций давления при у = 0 и изоповерхности Q-критерия, окрашенные в положительные/отрицательные значения z-завихренности. (a) Q = 0.0001 W02/H2; (b) Q = 0.018 W02/H2.

- Landel J.R., Caulfield C.P., Woods A.W. Meandering due to large eddies and the statistically self-similar dynamics of quasi-twodimensional jets // J. Fluid Mech. 2012. 692, 347–386.
- Chen D., Jirka G.H. Linear stability analysis of turbulent mixing layers and jets in shalow water layers // J. Hydraul. Res. 1998. 36 (5), 815–830.
- Holdeman J.D., Foss J.F. The initiation, development, and decay of the secondary flow in a bounded jet // J. Fluids Engng. 1975. 97 (3), 342–352.
- Rockwell D.O. Vortex stretching due to shear layer instability // J. Fluids Engng. 1977. 97, 240–243.





Рис. 3. Ближнее и дальнее поле струи с Рис. 2б.