

ПЕРЕКРЫТИЕ ДВУХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ЗОН ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ, ВЫЗВАННЫХ СДВИГОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТЬЮ

В. М. Ктиторов, О. Г. Синькова, Г. С. Фирсова, Ю. В. Янилкин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, Россия, г. Саров Нижегородской обл.

Рассмотрен процесс перекрытия двух параллельных симметричных ЗТП, образованных размытием тангенциальных разрывов. Определена скорость роста объединенной зоны перемешивания до выхода развития зоны на автомодельный режим. Расчеты проведены как в двумерной, так и в трехмерной постановке методом прямого численного моделирования уравнений гидродинамики без вязкости с использованием программ ЭГАК (2D) и ТРЭК (3D). Показано, что объединенная ЗТП растет медленнее, чем в автомодельном случае, и для выхода ее роста на автомодельный режим требуется время, заметно большее, чем рассмотренное в расчетах.

Численно исследован процесс перекрытия двух параллельных симметричных зон турбулентного перемешивания, образованных размытием тангенциальных разрывов. Определена скорость роста объединенной зоны перемешивания до выхода развития зоны на автомодельный режим. Расчеты проведены как в двумерной, так и в трехмерной постановке методом прямого численного моделирования уравнений гидродинамики без вязкости с использованием программ ЭГАК (2D) [1] и ТРЭК (3D) [2].

Данное исследование продолжает серию работ с частичным (Синькова О. Г., Янилкин Ю. В.) участием того же авторского коллектива, что и в настоящей работе, в которой с помощью прямого численного моделирования исследовался нестационарный плоский слой смешения, вызванный сдвиговой неустойчивостью [3, 4]. В настоящей работе рассмотрено близкое к рассмотренным ранее течение, в котором перекрываются два автомодельных турбулентных слоя смешения. При этом турбулентный режим нарушается и реализуется новый режим, также стремящийся к автомодельности с течением времени.

Начальная геометрия расчетов изображена на рис. 1. Во всех областях вещество – идеальный газ с $\gamma = 5/3$, плотность равна 1, скорость звука равна 2,9. В начальный момент на границах I, II заданы случайные возмущения вертикальной компоненты скорости, равные 0,1. Расстояние между границами I и II равно единице.

Проведен двумерный расчет с числом ячеек $N_x = 680$, $N_y = 380$, а также трехмерный расчет с $N_x = 200$, $N_y = 100$, $N_z = 100$ с введением дополнительного измерения z , перпендикулярного плоскости рисунка. Во всех расчетах наблюдалось объединение зон перемешивания,

образованных в результате размытия тангенциальных разрывов I и II.

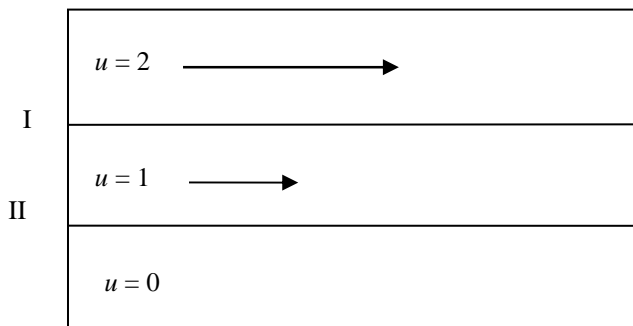


Рис. 1. Начальная геометрия расчетов, вектор скорости совпадает с направлением оси x

1. Скорость роста ширины ЗТП

На рис. 2 показана зависимость от времени вертикальных координат y границ зоны перемешивания в двумерном и трехмерном расчетах. Обе кривые на рисунке для двумерного и трехмерного расчетов состоят из четырех плавных участков и имеют вид буквы W , положенной набок. Веткам этой буквы по направлению сверху вниз присваиваем номера 1, 2, 3, 4.

На рис. 3, 4 показана зависимость от времени ширины ЗТП. Из рисунков видно, что рост каждой из зон турбулентного перемешивания (I, II) очень быстро выходит на автомодельный режим. Затем с момента перекрытия скорость роста объединенной зоны перемешивания (I–II) изменяется по-разному в двумерном и трехмерном расчетах:

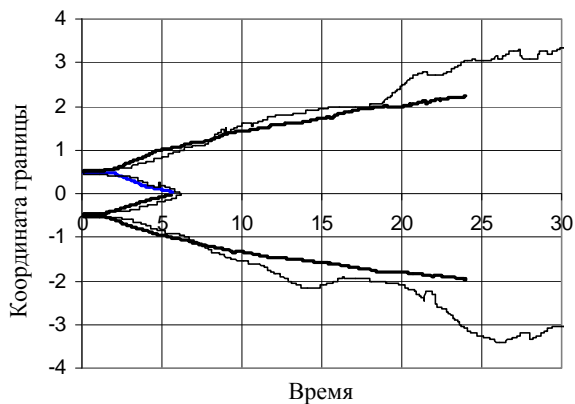


Рис. 2. Зависимость от времени вертикальных координат у границ зоны перемешивания в 2D и 3D расчетах. Трехмерный расчет выделен жирной линией

1) скорость роста ширины ЗТП в двумерном расчете практически не изменяется вплоть до момента $t \sim 15 \div 20$, когда скорость дважды резко изменяется – падает до нуля и затем возвращается к прежнему (автомодельному) значению $\dot{L} = 0,129$;

2) скорость роста ширины ЗТП в трехмерном расчете медленно и монотонно уменьшается по сравнению со скоростью автомодельного режима $\dot{L} = 0,129$ и остается постоянной (уменьшенной почти вдвое по сравнению с автомодельным значением, так что $\dot{L} = 0,68$). По-видимому, такое течение сохраняется вплоть до повторного выхода на автомодельный режим роста уже объединенной зоны.

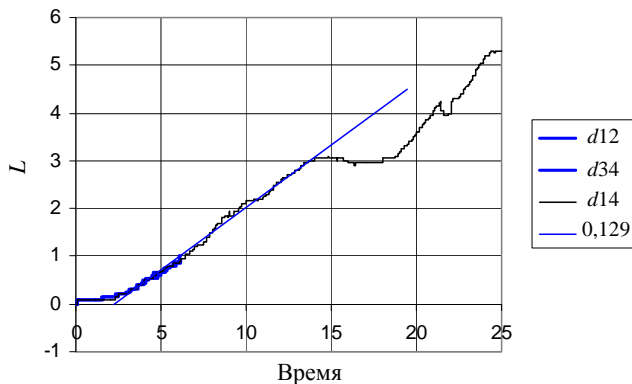


Рис. 3. Зависимость от времени ширины ЗТП в двумерном расчете. График построен как разность ординат кривых (в случае разности между 1 и 4 дополнительно вычитается единица – начальное расстояние между кривыми) на рис. 3. Значком $d12$ на рисунке обозначена разность между кривыми 1 и 2. Кривые $d12$ и $d34$ практически совпадают. Для прямой линии приведено значение \dot{L}

Различие между 2D и 3D расчетами проявляется и в наличии мелких возмущений (дребезга) на двумерных кривых. Причина их появления состоит, по-видимому, в том, что крупные вихри в трехмерных расчетах затухают, а в двумерных, напротив, должны сохранять заметную долю энергии.

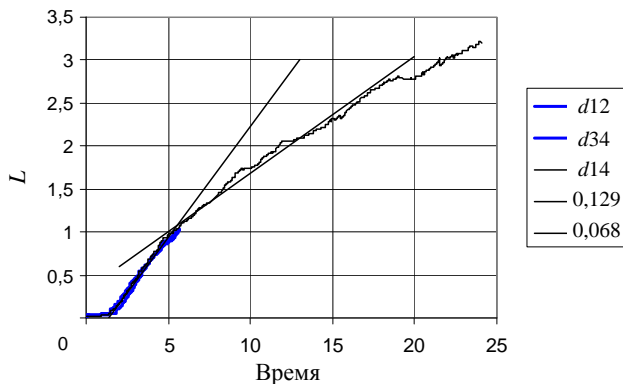


Рис. 4. Зависимость от времени ширины ЗТП в трехмерном расчете. График построен как разность ординат кривых (минус единица) на рис. 3. Кривые $d12$ и $d34$ практически совпадают. Для прямых линий приведены значения \dot{L}

2. Профили энергии в расчетах

Профили турбулентной энергии $k(y)$ для различных моментов времени в обоих расчетах представлены на рис. 5, 6. При этом энергия нормирована согласно формуле:

$$k = \frac{\langle u^2 \rangle - \langle u \rangle^2}{2U_0^2}, \quad (1)$$

где скорость $U_0 = 1$ для $t = 5$ и $U_0 = 2$ в остальных случаях.

Из рис. 6 видно, что при $t = 5$ в каждой из двух начальных ЗТП значение k достигает известного из эксперимента [5] «автомодельного» значения 0,04 и впоследствии, после объединения ЗТП, резко уменьшается –

и вновь стремится снизу к автомодельному значению.

Качественно та же картина наблюдается и в трехмерном расчете с тем отличием, что начальный участок (образование двух ЗТП) в нашей процедуре усреднения описан неточно.

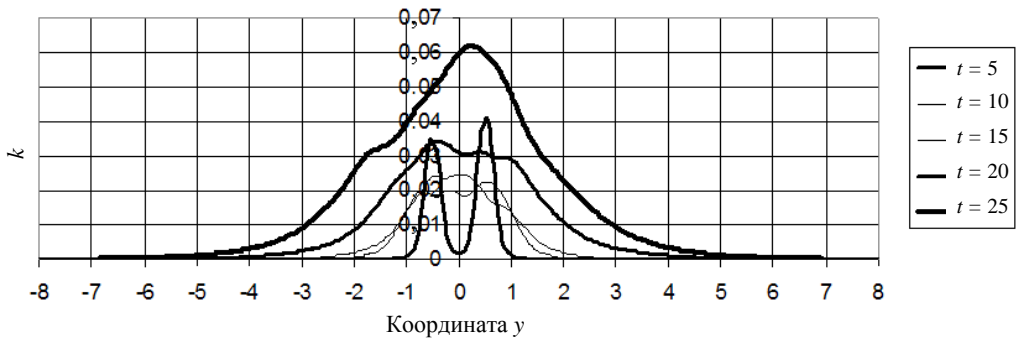


Рис. 5. Профили турбулентной энергии в двумерном расчете

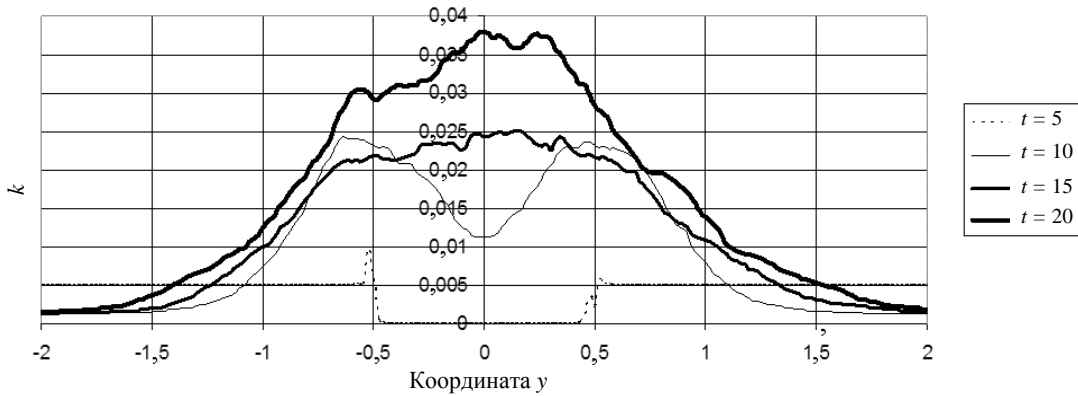


Рис. 6. Профили турбулентной энергии в трехмерном расчете

3. Анизотропия пульсаций скорости

На рис. 7–9 показаны компоненты тензора турбулентной энергии, полученные по формуле (1) для различных компонент скорости. Из рисунков видно, что для компонент тензора выполняются соотношения, присущие автомодельному режиму [5]: поперечные компоненты xx и zz равны между собой, а продольная компонента yy – примерно в два раза их превосходит.

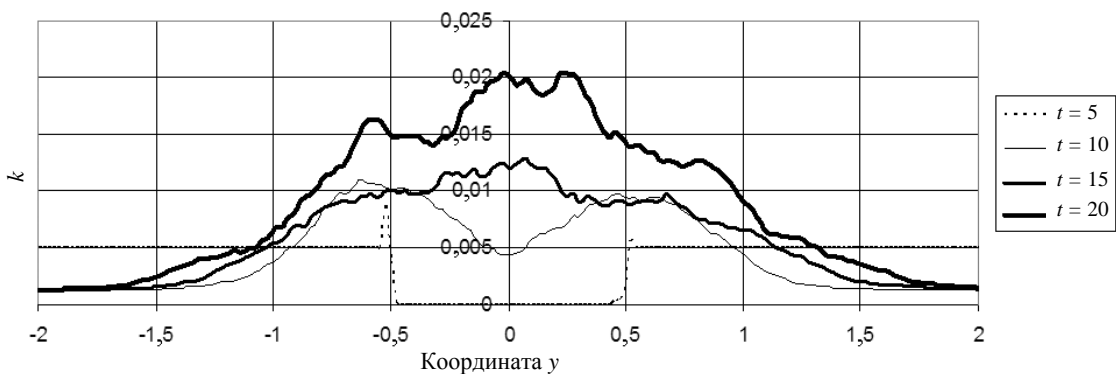


Рис. 7. Продольные компоненты тензора турбулентной энергии

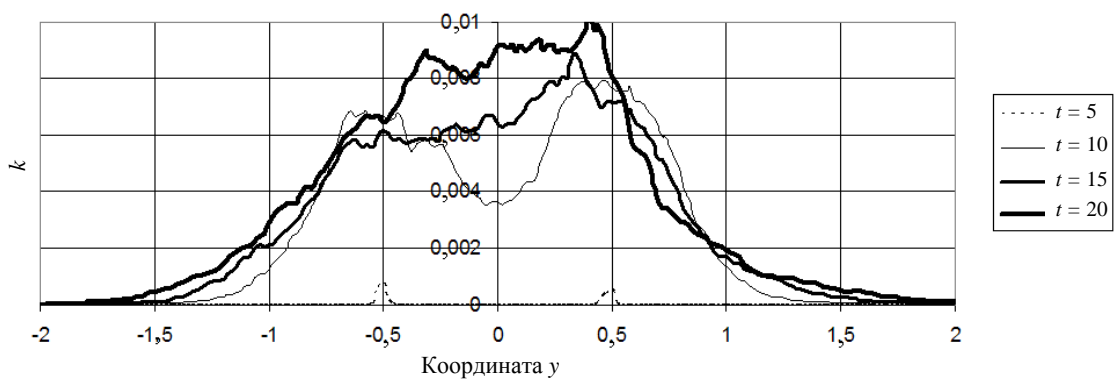


Рис. 8. Профили поперечной компоненты xx турбулентной энергии в трехмерном расчете

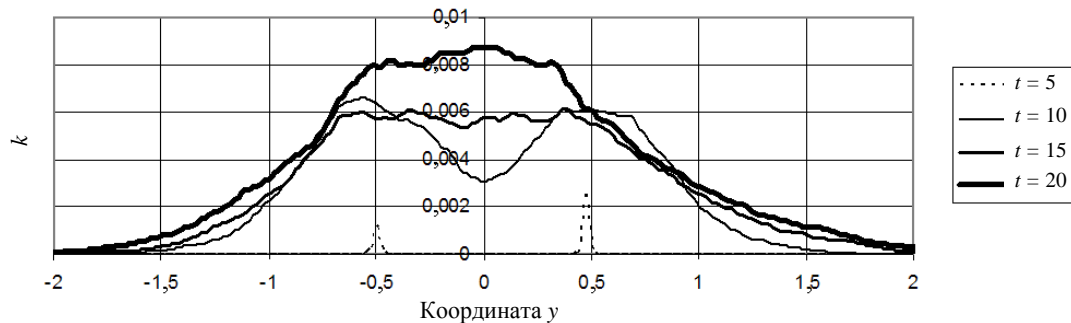


Рис. 9. Профили поперечной компоненты zz турбулентной энергии в трехмерном расчете

Заключение

Проведенное прямое 2D, 3D численное моделирование показало, что перекрытие двух автомодельно растущих ЗТП, вызванных сдвиговой неустойчивостью, приводит к сложной картине развития, причем детали картины различны в двумерном и трехмерном случаях. Объединенная ЗТП растет медленнее, чем в автомодельном случае. Для выхода ее роста на автомодельный режим требуется время, заметно большее, чем рассмотренное в расчетах $t \sim 20L/U_0$, где L и U_0 – соответственно ширина ЗТП в момент перекрытия и разность скоростей на границах ЗТП.

При этом главные характеристики ЗТП в расчетах: скорость роста, профили турбулентной энергии, анизотропия – находятся в согласии с существующими представлениями.

Список литературы

1. Шанин А. А., Янилкин Ю. В. Комплекс программ ЭГАК. Газодинамические разностные схемы в эйлеровых переменных // ВАНТ. Сер. ММФП. 1993. Вып. 1. С. 24–30.

2. Yanilkin Yu. V., Tarasov V. I., Stadnik A. L., Bazhenov S. V., Bashurov V. V., Belyaev S. P., Bondarenko Yu. A., Bykova E. A., Gavrilova E. S., Gorev V. V., Dibirov O. A., Ivanova G. G., Kovalev N. P., Korol'kova T. V., Pevnaya P. I., Sofronov V. N., Toropova T. A., Shanin A. A. Program System TREK for Numerical Simulation of 3D Multi-component Medium Flows. Proceedings of workshop «New Models and Numerical Codes for Shock Wave Processes in Condensed Media», Oxford, 1997. P. 413–422.

3. Sin'kova O. G., Statsenlo V. P., Yanilkin Yu. V. Direct 3D numerical simulation of shear turbulent mixing. Proceedings of the 9th International Workshop on the Physics of Compressible Turbulent Mixing, Cambridge (UK), 2004. P. 262–269.

4. Жмайло В. А., Синькова О. Г., Стаценко В. П., Янилкин Ю. В. Прямое трехмерное численное моделирование сдвигового турбулентного перемешивания // ВАНТ. Сер. ТПФ. 2004. Вып. 3. С. 23–39.

5. Browand F. K., Latigo D. O., Growth of the two-dimensional mixing layer // Phys. Fluids. 1979. Vol. 22, N 6. P. 1011.

Статья поступила в редакцию 26.10.2010.