

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ МЕТОДОМ КРУПНЫХ ВИХРЕЙ

А. Ж. Жайнаков, Институт горного дела и горных технологий им. У. И. Асаналиева Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан, jainakov-41@mail.ru

А. Б. Курбаналиев, Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, kurbanaliev@rambler.ru

С. С. Акназарова, Ошский государственный университет, г. Ош, Кыргызстан, saknazarova@list.ru

А. Т. Калмурзаева, Кызыл-Кийский педагогический институт Баткенского государственного университета, г. Кызыл-Кия, Кыргызстан, anira.kalmurzaeva.80@mail.ru

Аннотация. В области вычислительной гидродинамики моделирование турбулентных течений жидкости и газа по-прежнему является наиболее актуальной задачей. В данной работе представлены численные результаты моделирования некоторых турбулентных течений методом крупных вихрей. Результаты моделирования включают нестационарный анализ сложных потоков, такие как вихревая динамика турбулентных струй, подверженных входным возмущениям.

Ключевые слова: Численное моделирование, вычислительная гидродинамика, модели турбулентности, Метод крупных вихрей.

LES MODELLING OF TURBULENT FLOWS

A. Zh. Zhainakov, Asanaliev Institute of Mining and Mining Technologies of the Razzakov Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyzstan, jainakov-41@mail.ru

A. I. Kurbanaliev, Osh state university, Osh, Kyrgyzstan, kurbanaliev@rambler.ru

S. S. Aknazarova, Osh state university, Osh, Kyrgyzstan, saknazarova@list.ru

A. T. Kalmurzaeva, Kyzyl-Kya Pedagogical Institute of Batken of State University, Kyzyl-Kya, Kyrgyzstan, anipa.kalmurzaeva.80@mail.ru

Annotation. In the field of computational hydrodynamics, the modeling of turbulent flows of liquid and gas is still the most urgent problem. This paper presents the numerical results of modeling some turbulent flows using the large eddy simulation method. The simulation results include non-stationary analysis of complex flows, such as vortex dynamics of turbulent jets, with input disturbances.

Keywords: Numerical simulation, computational fluid dynamics, turbulence models, Large eddy method.

Введение. Вклад вычислительной гидродинамики в развитии различных областей науки и техники представляется особенно многообещающим в XXI веке в качестве основы для развития технологий, социальной безопасности жизни и сохранения окружающей среды. При этом появляется острая необходимость в разработке программного обеспечения следующего поколения для высокопроизводительных вычислительных систем. Для продолжения исследований и разработок в области динамики жидкостей необходима новая инновационная технология, которая может хорошо адаптироваться к строгим требованиям и мировым стандартам, предъявляемым в последнее время к проблемам окружающей среды и энергетики. С этой целью была исследована оптимизация конструкции для множества сложных условий, чтобы помочь в разработке ключевой технологии, основанной на изучении трехмерных нестационарных особенностей в потоках жидкости. Этот метод будет использоваться не только для фундаментальных исследований, но и для практического применения. Последние инновационные компьютерные технологии позволили добиться значительных успехов в области компьютерной инженерии, которая обеспечивает более реалистичное численное моделирование и визуализацию и может быть применена к трехмерному нестационарному анализу турбулентных потоков жидкости детальным и простым способом [3].

В данной работе представлены численные результаты моделирования методом крупных вихрей турбулентного течения в прямоугольном канале с постоянным поперечным сечением. Целью работы было сравнение возможностей различных вариантов метода моделирования крупных вихрей: k-модели с одним уравнением [5, с. 104], модель Смагоринского [5, с. 102] и модель Спаларта-Аллмараса. Результаты моделирования включают нестационарный анализ сложных потоков, такие как вихревая динамика турбулентных струй, подверженных входным возмущениям. В целях проверки достоверности численных результатов проведено сравнение с данными прямого численного моделирования работы [2], где выполнено численное решение полных нестационарных уравнений Навье–Стокса и уравнения неразрывности с учетом всех характерных особенностей рассматриваемого течения без необходимости применения дополнительного моделирования. Для численных расчётов использовался открытый пакет OpenFOAM 6 [4].

Математическая модель. Нестационарное турбулентное течение несжимаемой жидкости с постоянной вязкостью при отсутствии массовых сил, описывается следующими осредненными по пространству уравнениями Навье–Стокса [5, с. 100]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\bar{\mathbf{u}}) = 0$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{\mathbf{u}})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \mu \operatorname{div}(\operatorname{grad}(\bar{\mathbf{u}})) - (\operatorname{div}(\rho \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}) - \operatorname{div}(\rho \bar{\mathbf{u}} \bar{\mathbf{u}}))$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\bar{v}\bar{\mathbf{u}}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial y} + \mu\operatorname{div}(\operatorname{grad}(\bar{v})) - (\operatorname{div}(\rho\bar{v}\bar{\mathbf{u}}) - \operatorname{div}(\rho\bar{u}\bar{v})) \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{w})}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho\bar{w}\bar{\mathbf{u}}) = -\frac{\partial\bar{p}}{\partial z} + \mu\operatorname{div}(\operatorname{grad}(\bar{w})) - (\operatorname{div}(\rho\bar{w}\bar{\mathbf{u}}) - \operatorname{div}(\rho\bar{w}\bar{\mathbf{u}}))$$

Здесь компоненты отфильтрованной скорости обозначены через \bar{u} , \bar{v} , \bar{w} , а \bar{p} – отфильтрованное давление, μ – динамическая вязкость жидкости, Влияние турбулентных пульсаций на характеристики среднего течения производится на основе LES модели турбулентности [5, с. 66].

Численная модель. Метод контрольного объема [6, с. 24] применяется для дискретизации всей расчетной области, которая разбивается на конечное число непересекающихся между собой контрольных объемов гексаэдрической формы. При этом в каждом одном контрольном объеме содержится толка одна узловая точка. Затем система дифференциальных уравнений интегрируется по каждому контрольному объему. Для вычисления интегралов используют линейно-кусочные профили, описывающие изменение искомой величины между узловыми точками. Кинетическая энергия турбулентности и скорость её диссипации имеют некоторые малые значения, которые обеспечивают хорошую сходимость численного решения на первых шагах интегрирования.

Начальные и граничные условия. Так как при моделировании методом крупных вихрей решается нестационарная система уравнений Навье-Стокса, то необходимо задание подходящих начальных и граничных условий [5, с. 106]. Для стационарных течений начальное состояние потока определяет только продолжительность времени, необходимого для достижения стационарного состояния, и обычно достаточно указать начальное поле течения, которое обычно предполагает сохранение массы с правильным уровнем турбулентности. Если развитие зависящего от времени потока зависит от его начального состояния, необходимо указать начальные условия более точно, используя данные из других источников, например, из результатов прямого численного моделирования и с эксперимента.

Граничные условия на твердых стенках канала для турбулентных величин ставились при помощи аппарата пристеночных функций, позволяющих снести граничные условия непосредственно со стенок в первый от стенки сеточный узел [1, с. 276].

Задание граничных условий на входе в расчетную область очень сложно, в силу того факта, что входные свойства потока влияют на поля течения вниз по потоку. Поэтому неправильное определения входных граничных условий часто приводит к ухудшению качества полученных численных результатов. В данной работе использован простейший метод - указаны экспериментально измеренные распределения поле средней скорости с наложенными случайными возмущениями Гаусса с правильной интенсивностью турбулентности. Более подробно о других методах задания входных граничных условий можно получить из [5, с. 106]. На выходе из канала продольные градиенты всех искомых переменных, кроме давления полагаются равными нулю.

Численное решение систем нелинейных уравнений проведено с помощью приложения pisoFoam пакета OpenFOAM, которое предназначено для нестационарных турбулентных течений и использует известный алгоритм сопряжения скорости и давления PISO [5, с. 193, 1, с. 176, с. 195]. Относительная ошибка сходимости итераций для всех рассматриваемых переменных была равной $\varepsilon = 10^{-5}$.

Постановка задачи. Рассмотрим полностью развитое несжимаемое турбулентное течение в квадратном канале (см. рис. 1). Прямоугольный канал имеет длину $L = 4$ м, ширину $D = 2$ м и высоту $D = 2$ м.

При моделировании методом крупных вихрей, крупные вихри рассчитываются, а мельчайшие вихри подсеточного масштаба моделируются. Основной предпосылкой такого подхода является то, что наибольшие вихри несут максимум реинольдсовых напряжений и должны быть рассчитаны. Мелкие же вихри содержат невысокие значения реинольдсовых напряжений, кроме того, мелкомасштабная турбулентность близка к изотропной и имеет в большей степени подающиеся моделированию близкие к универсальным характеристикам.

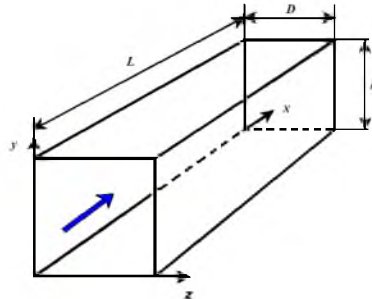


Рис. 1. Геометрия рассматриваемой задачи.

Обсуждение численных результатов. Сравнение результатов моделирования для средней линии канала с результатами прямого численного моделирования работы [2] приведено на рис. 2. Сравнение произведено для средней скорости, напряжения вязкого сдвига и Рейнольдса. При этом эти величины были нормированы следующим образом. Скорость

разделена на величину $U_0 = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \langle U \rangle dy$, где $\langle U \rangle$ – осредненная по времени скорость, $\delta = D/2$.

Вязкие напряжения отнесены на величину $\rho v \frac{d \langle U \rangle}{dy}$, где v – представляет собой флуктуацию скорости в направлении оси y . Напряжения Рейнольдса представлены в единицах $\rho \langle uv \rangle$, где u – флуктуация скорости в направлении оси x . Таким образом, полные напряжения сдвига равны сумме вязких напряжений и напряжений Рейнольдса.

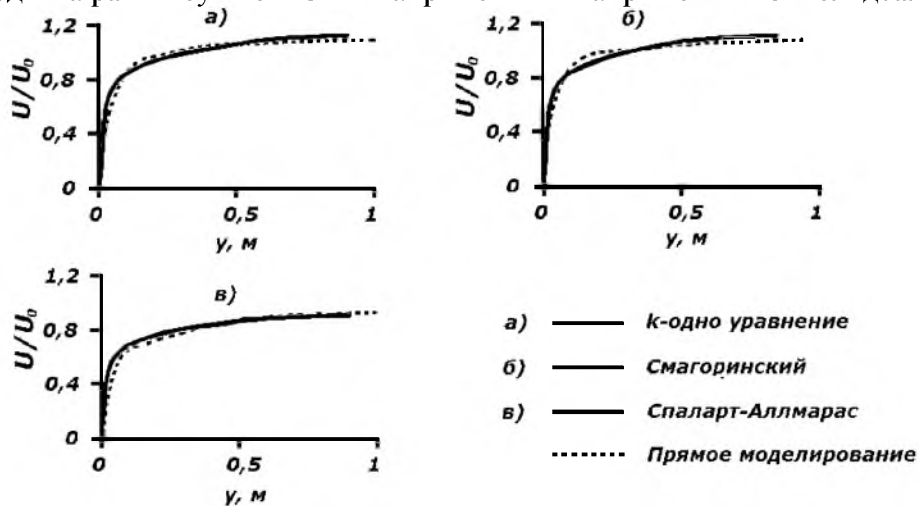


Рис. 2 Сравнение профилей средней скорости.

Из рис. 2 видно, что, хотя все три модели турбулентности дают одинаковые результаты по профилям средней скорости, более хорошее совпадение дает модель Спарлата–Аллмараса. Остальные две модели во внутреннем слое при $y < 0,1$ м дают меньшие, во внешнем слое, при $y > 0,2$ м вплоть до $y = 0,5$ м, завышенные значения скорости. После этого момента обе модели дают заниженные значения скорости.

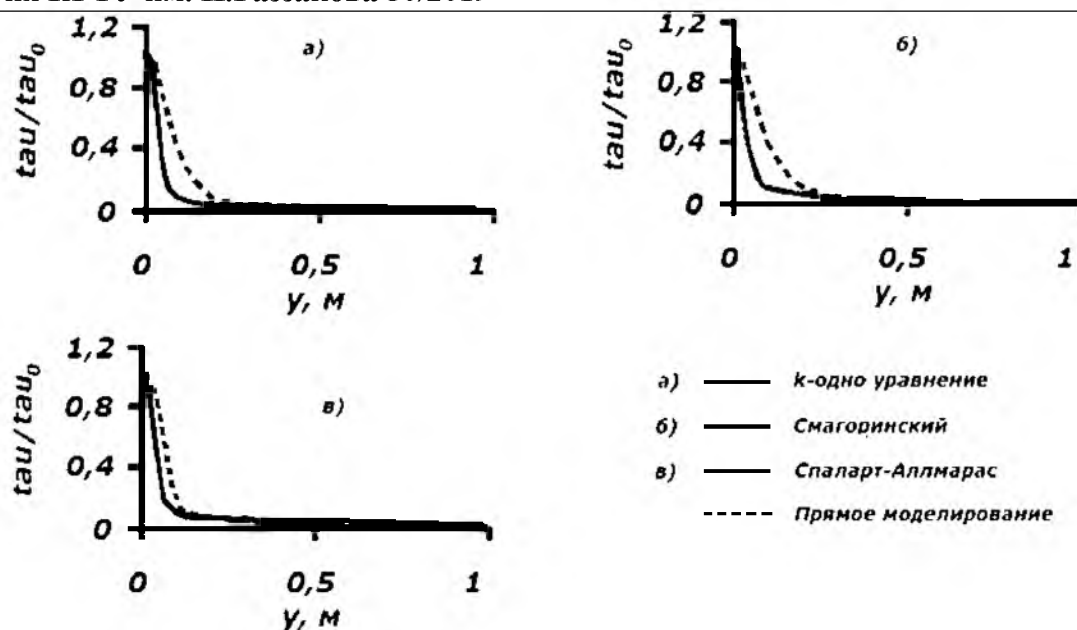


Рис. 3. Сравнение вязких напряжений.

Как видно из рис. 3, все три модели одинаково повторяют характер изменения вязких напряжений, хотя численные значения вязких напряжений несколько завышены.

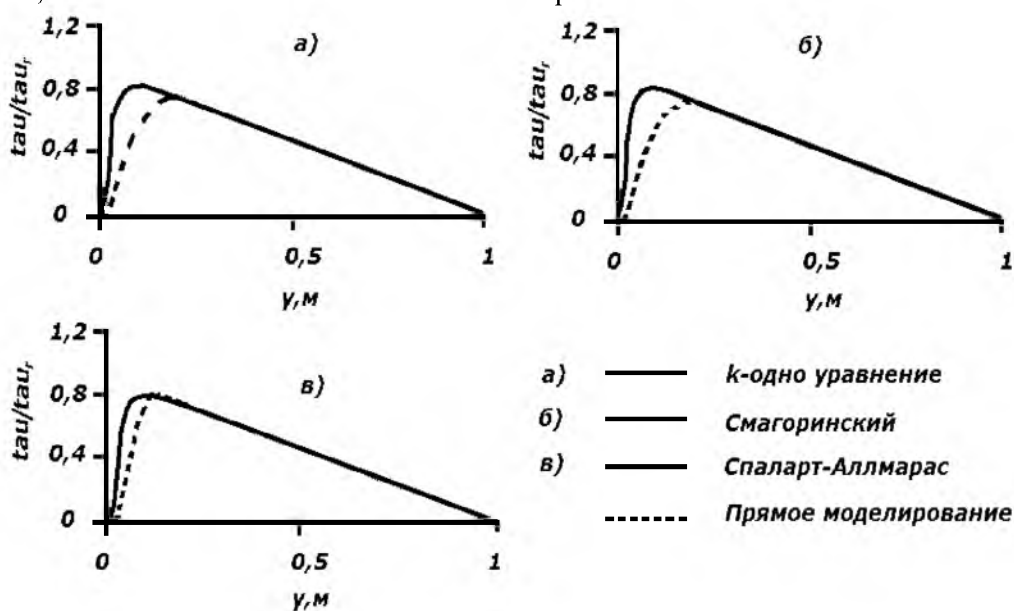


Рис.4. Сравнение напряжений Рейнольдса.

В случае использования моделирования методом крупных вихрей, наибольшие вихри рассчитываются, а мелкие вихри, размеры которых меньше линейных размеров расчетной сетки моделируются. Это основано на том факте, что большим вихрям соответствуют наибольшие значения напряжений Рейнольдса и поэтому они рассчитываются. А вихрям малых размеров соответствуют малые значения напряжений Рейнольдса, турбулентность такого малого масштаба обычно является изотропной и их можно легко моделировать.

Выводы. Здесь представлены численные результаты моделирования некоторых турбулентных течений методом крупных вихрей. Результаты моделирования включают нестационарный анализ сложных потоков, такие как вихревая динамика турбулентных струй, подверженных входным возмущениям. По результатам численных расчетов с использованием различных вариантов метода моделирования крупных вихрей, можно сказать, что модель

Спаларта–Аллмараса дает приемлемые результаты для моделирования рассматриваемого класса течений.

Список литературы

1. Ferziger J.H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics // Springer Verlag, 2002. 423 p.
2. Kim J., Moin P., Moser R. Turbulence statistics in fully developed channel flow at low Reynolds number. //Journal of Fluid Mechanics. –1987. –Vol.177. – P.133–166.
3. Kobayashi T. Large Eddy simulation for engineering applications. Fluid Dynamics Research 38 (2006) 84–107.
4. OpenFOAM user guide. Version 6. <https://cfd.direct/openfoam/user-guide/>.
5. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics // Edinburg: Pearson Education Limited, 2007.517p.
6. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с. англ. –М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с