УДК 532.517.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТУРБУЛЕНТНОГО ОБТЕКАНИЯ ТРЁХМЕРНЫХ ТЕЛ ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Жайнаков Аманбек Жайнакович *– д.ф-м.н., профессор, академик НАН КР, заведующий кафедрой математического моделирования и информационных технологий, Институт горного дела и горных технологий им. У. А. Асаналиева, Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан. jainakov-41@mail.ru*
Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич *– д.ф-м.н., профессор, заведующий кафедрой естественных наук и математики, международный медицинский факультет, Ошский государственный университет. kurbanaliev@rambler.ru*
Осконбаев Маралбек Чотоевич *– к.ф-м.н., доцент, кафедра экспериментальной и теоретической физики, физико-технический факультет, Ошский государственный университет. o_manas@mail.ru*
Калеева Анара Колбаевна *– преподаватель кафедры естественно-математического образования Кызыл-Кийского педагогического института Баткенского государственного университета. Kaleeva-79@mail.ru*

Аннотация. Проблема взаимодействия человека с окружающей средой в настоящее время представляет новую и активно развивающуюся область применений методов математического моделирования. По мере развития промышленности, энергетики, средств транспорта антропогенное загрязнение биосферы, обусловленное жизнедеятельностью человека, непрерывно возрастает.В работе представлены результаты математического прогнозирования особенностей обтекания различных моделей сооружения призматической формы несжимаемым воздушным потоком. Численное моделирование основано на усредненных по Рейнольдсу стационарных трёхмерных уравнениях Навье-Стокса. Для учета

влияния турбулентных пульсаций на средние характеристики поля течения использовались двухпараметрические RANS модели турбулентности, основанные на гипотезе линейной и нелинейной вихревой вязкости. Численные расчеты проводились с использованием открытого пакета OpenFOAM, который является свободно распространяемым пакетом программ вычислительной гидродинамики.Проведено сравнение численных результатов с данными Архитектурного института Японии – AIJ.В целом, точность предсказания при помощи открытого пакета OpenFOAM поля средней скорости вблизи различных призматических моделей одиночного здания является удовлетворительной. Численные расчеты, полученные при помощи различных двухпараметрических моделей турбулентности, адекватно(с небольшими отклонениями) повторяют характер изменения экспериментальных данных. Однако, при моделировании обтекания блока одинаковых кубов, согласие между экспериментом и расчетом несколько ухудщается, что требует более точной детализации расчетной сетки, модели турбулентности, граничных условий и методов решения систем линейных алгебраических уравнений.

Ключевые слова. Отрывные течения, RANS модели, метод контрольных объемов, OpenFOAM, AIJ, турбулентность, пульсация, экологически вредная примесь, призматическая модель здания, simpleFoam.

MODELLING OF TURBULENT FLOWS AROUND THE THREE DIMENSIONAL PRISMATIC BODIES

Zhainakov Amanbek Zhainakovich *- Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Academician of the National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic, Head of the "Mathematical Modeling and Information Technologies" department, Institute of Mining and Mining Technologies named after. U.Asanaliev of the Kyrgyz State Technical University. I.Razzakova, Bishkek, Kyrgyzstan. jainakov-41@mail.ru*
Kurbanaliev Abdikerim Yrysbayevich *- Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the "Natural Sciences and Mathematics" department, International Medical Faculty, Osh State University. kurbanaliev@rambler.ru*
Oskonbaev Maralbek Chotovich *- Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Department of Experimental and Theoretical Physics, Faculty of Physics and Technology, Osh State University. o_manas@mail.ru*
Kaleeva Anara Kolbayevna *- teacher at the "Natural and Mathematical Education" department of the Kyzyl-Kiy Pedagogical Institute of the Batken State University. Kaleeva-79@mail.ru*

Annotation. Nowadays, the problem of human interaction with the environment represents a new and actively developing research field of applications of mathematical modelingmethods. As the industry, the energy consumption, transport develops, the anthropogenic pollution of the biosphere, caused by human activity, is continuously increasing. The paper presents the results of mathematical prediction of the features of flow around various models of a prismatic structure with an incompressible airflow. The numerical simulation is based on the Reynolds averaged stationary three-dimensional Navier-Stokes equations. To account for the influence of turbulent pulsations on the average characteristics of the flow field, two-parametric RANS turbulence models were used, which are based on the hypothesis of linear and nonlinear eddy viscosity. Numerical calculations were carried out by using an open package OpenFOAM, which is a freely available package of computational fluid dynamics. The numerical results are compared with the data of the Architectural Institute of Japan - AIJ. In general, the accuracy of the prediction using an open OpenFOAM package of medium speed field near various prismatic models of a single building is satisfactory. Numerical calculations, obtained with the help of various two-parametric models of

turbulence, adequately (with small deviations) repeat the nature of the change of the experimental data. However, when modeling the flow around a block of identical cubes, the agreement between experiment and calculation is somewhat degraded, which requires a more detailed specification of the computational grid, the turbulence model, boundary conditions, and methods of solving systems of linear algebraic equations.

Keywords. Separation flows, RANS models, control volumes method, OpenFOAM, AIJ,turbulence, pulsation, environmentally harmful admixture, prismatic building model, simpleFoam,

ҮЧ ӨЛЧӨМДҮҮ ПРИЗМА ФОРМАСЫНДАГЫ НЕРСЕЛЕРДИН АЙЛАНАСЫНДАГЫ ТУРБУЛЕНТТҮҮ АГЫМДАРДЫ МОДЕЛДЕШТИРҮҮ

Введение. Проблема взаимодействия человека с окружающей средой в настоящее время представляет новую и активно развивающуюся область применений методов математического моделирования. По мере развития промышленности, энергетики средств транспорта антропогенное загрязнение биосферы, обусловленное жизнедеятельностью человека, непрерывно возрастает.

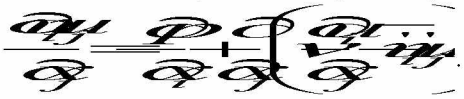
Полевые измерения и физический эксперимент в аэродинамической трубе являются двумя традиционными методами исследования характеристик ветрового поля и распределения экологически вредных примесей вокруг зданий [1-10]. Однако оба этих метода являются дорогостоящими, что затрудняет их практическое применение.

Численное моделирование аэродинамических характеристик различных зданий и сооружений является достаточно трудоемкой задачей из-за сложной геометрической формы, а также из-за сложного нестационарного течения, образующегося в результате их обтекания. При этом сложность обтекания предполагает выполнение не единичного, а целого ряда расчетов. Интерференция же спектра различных вихревых структур и масштабов между различными объектами еще более усложняет поставленную задачу. Поэтому точное моделирование предполагает использование эффективного, хорошо апробированного и верифицированного математического аппарата вычислительной гидродинамики с использованием высокопроизводительной вычислительной техники.

Целью данной работы является создание математической модели и комплекса прикладных программ и геоинформационных систем, позволяющих получать с помощью открытого пакета OpenFOAM устойчивые и достаточно точные численные решения, для описания поля течения и распределения концентраций экологически вредных примесей, в приземном слое атмосферы.

В данной работе приведены результаты численного моделирования обтекания воздушным потоком различных моделей сооружения с помощью открытого пакета OpenFOAM v4[11], использующий метод контрольных объемов для дискретизации основных уравнений. Открытость исходного кода данного пакета предоставляет широкие возможности по изучению и доработке реализованных в нем математических моделей, методов решения систем линейных алгебраических уравнений, численных методов решения дифференциальных уравнений в частных производных методом контрольного объема.

Математическая модель.Осредненные по Рейнольдсу уравнения непрерывности и переноса импульса без учета массовых сил, в тензорных обозначениях в декартовой система координат записываются следующим образом [12, с. 293]:

$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0,$  . Здесь u_i и $u_i^{'}$ – средняя и пульсационная скорости в направлении оси x_i соответственно, p – давление, ν – коэффициент

кинематической вязкости, ρ −плотность жидкости, а $\overline{u_i' u_j'}$ − неизвестные напряжения Рейнольдса.

Модель турбулентности. Длязамыканиявышеприведённых систем уравнений в рамках приближения Буссинескапроизводится на основе двухпараметрических RANS–моделей турбулентности [13, с. 66]. Например, в случае использования стандартной $k-\varepsilon$ −модели турбулентности[12, с.294]система уравнений дополняются следующими двумя уравнениями:

$$\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j} + P_k - \rho\varepsilon$$

$$\frac{\partial(\rho u_j \varepsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} + C_{\varepsilon 1} P_k \frac{\varepsilon}{k} - \rho C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k}$$

Здесь производство кинетической энергии турбулентности вычисляется по формуле: $P_k = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j}$, а коэффициенты замыкания равны следующим стандартным величинам: $C_\mu = 0.09; C_{\varepsilon 1} = 1.44; C_{\varepsilon 2} = 1.92; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3$. Турбулентная динамическая вихревая вязкость воздуха вычисляется по значениям кинетической энергии турбулентности и скорости её диссипации по формуле: $\mu_t = \rho C_\mu k^2/\varepsilon$.

Для проверки адекватности принятой математический модели и достоверности полученных численных результатов рассматривались тестовые задачи из работы [14], часть которых приведена на рис. 1. Во всех случаях начало систем координат расположено в центре основания центрального сооружения.

Численная модель. Для численного решения вышеуказанных дифференциальных уравнений необходимо произвести дискретизацию расчетной области и самих дифференциальных уравнений. Дискретизация расчетной области производится хорошо известным методом контрольного объема[12, с. 71, 13, с. 115]. Данный метод в достаточной степени обеспечивает выполнение законов сохранения массы и энергии [15, с. 24].Дополнительную информацию о численной модели можно найти в [11, 16-18].

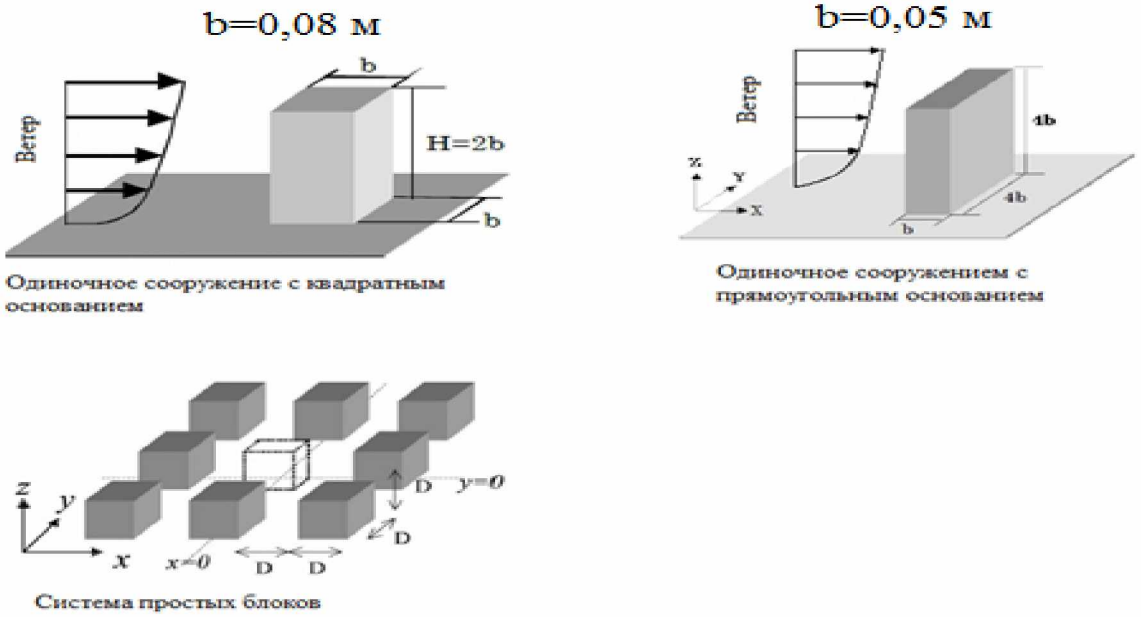


Рис. 1. Тестовые задачи из AIJ [14].

Тестовая задача №1 – одиночное сооружение с квадратным основанием.Расчетная областьимела размеры $21b \times 13.75b \times 11.25b$ в направлениях осей x, y и zсоответственно.Расчетная сетка (рис. 2) имела $60 \times 45 \times 39$ ячеек по направлениям осей x, y и zсоответственно, что соответствует общему числу 105 300 ячеек. Область модели одиночного сооружения разделена на 9×9×15=1215 ячеек.

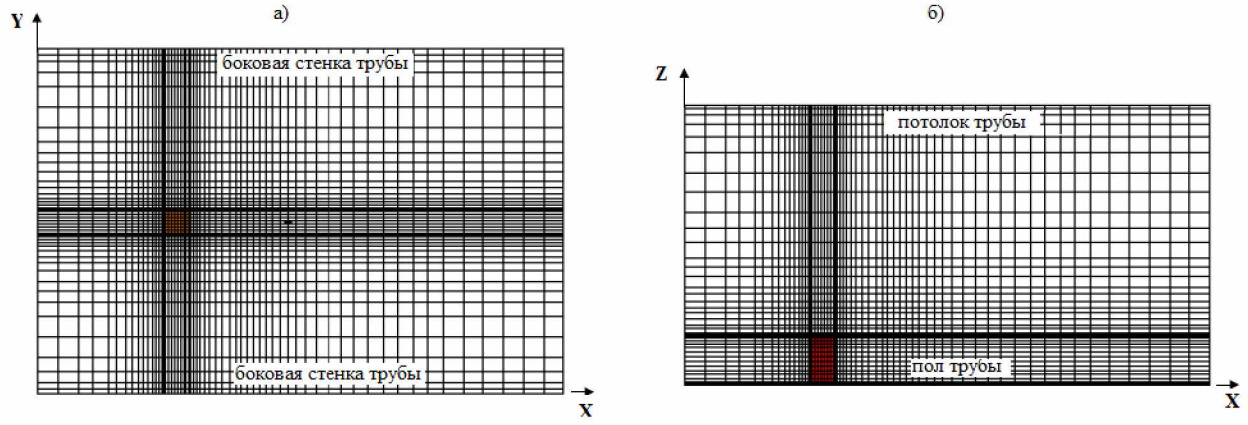


Рис. 2. Расчетная сетка: а) – вид сверху, б) – вид сбоку.

Входные граничные профили x - компоненты скорости u и кинетической энергии турбулентности представлены на рис. 3. Диссипация кинетической энергии турбулентности аппроксимирована при помощи формулы $\varepsilon = \sqrt{C_\mu} \cdot k \cdot \dfrac{du}{dz}$ в предположении, что генерация кинетической энергии турбулентности равна скорости её диссипации. Число Рейнольдса Re рассчитанное через высоту здания $H = 0{,}16м$ и значение входной скорости u_0 при $z = H$ было равно 24000.

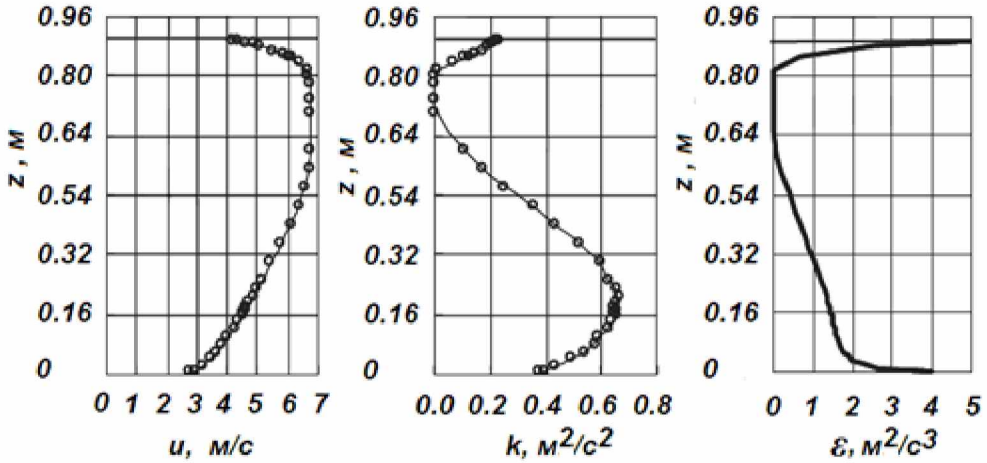


Рис.3. Распределения входных условий для u, k и ε.

На рис. 4 представлено сравнение численных результатов с соответствующими экспериментальными данными по вертикальным профилям (при y= 0)продольной скорости u и кинетической энергии турбулентности k при различных значениях безразмерной координатыx/b.Здесь и на последующих рисунках сплошная линия соответствует расчетным данным, а маркеры – эксперименту. В целом, соответствие между экспериментальными

данными и результатами численных расчетов продольной скорости u следует признать удовлетворительным.

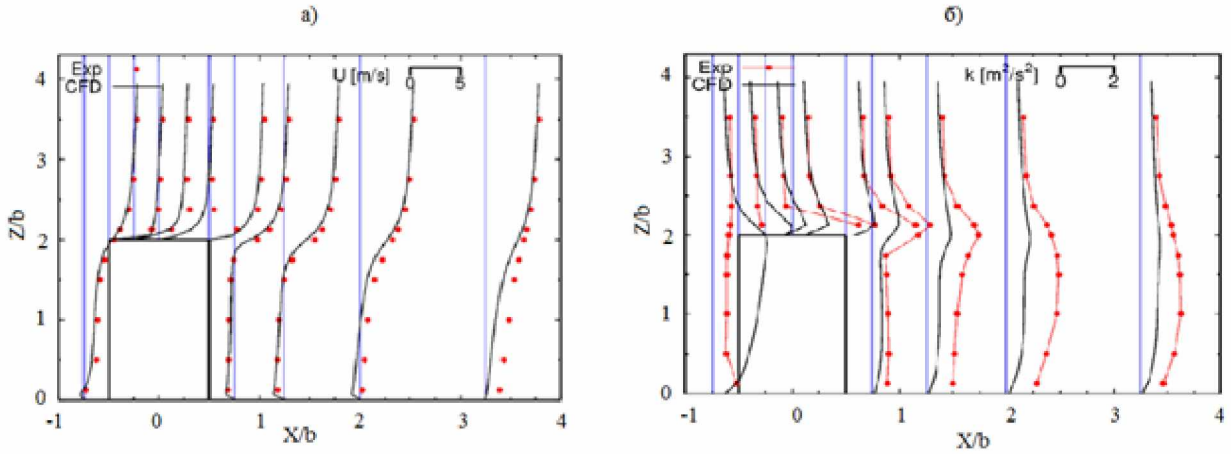


Рис. 4. Вертикальные профилискорости u и кинетической энергии турбулентности k.

Однако имеются завышенные расчетные значения по кинетической энергии турбулентности k в области перед и над сооружением. При использовании классической $k-\varepsilon$ −модели турбулентности, из-за завышенного значения турбулентной диффузии, зона обратных токов над сооружением в расчетах не обнаружена.

На рис. 5приведено сравнение продольнойu (слева) ипоперечнойv(справа) скоростей в горизонтальной плоскости вблизи нижней стенки - пола аэродинамической трубы (z/b =0,125). Соответствие между экспериментам и расчетом удовлетворительное. Однако, в турбулентном следе за сооружением, расчетные значения продольной скорости несколько занижены.

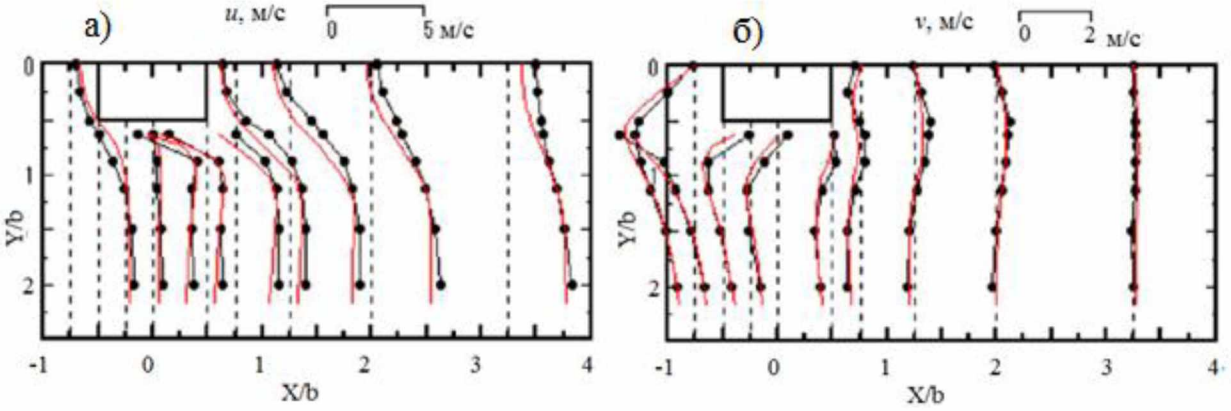


Рис. 5. Горизонтальные профили скоростей u и vпри z/b =0,125.

При $z/b = 1{,}25$ по боковым сторонам сооружения распределения расчетных значений скорости u слегка завышены, а скорость vзанижена(рис. 6) , а в остальных областях соответствие достаточно хорошее.

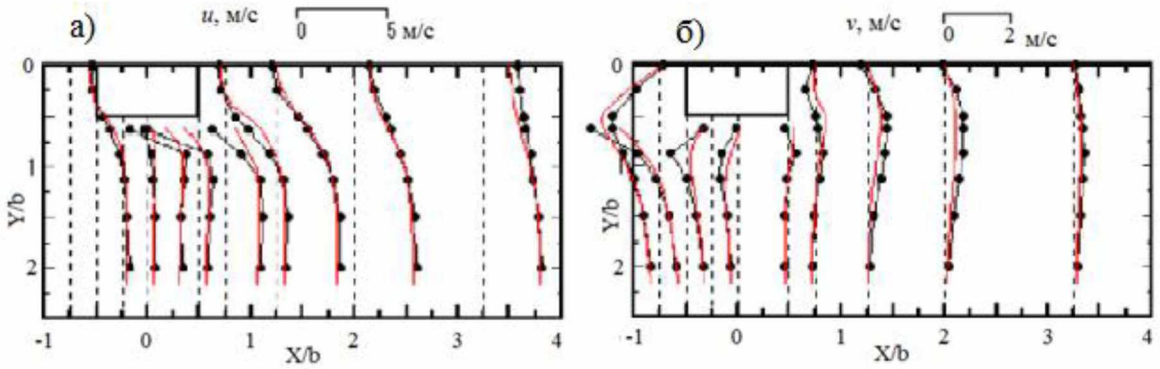


Рис. 6. Горизонтальные профили скоростей u и vпри $z/b = 1{,}25$.

В горизонтальной плоскости вблизи нижней стенки трубы (z/b = 0,125) завышенные значения кинетической энергии турбулентности в расчетах отсутствуют (см. рис. 7а) и распределение скоростей вблизи боковой поверхности здания воспроизводится относительно хорошо (см. рис 5).

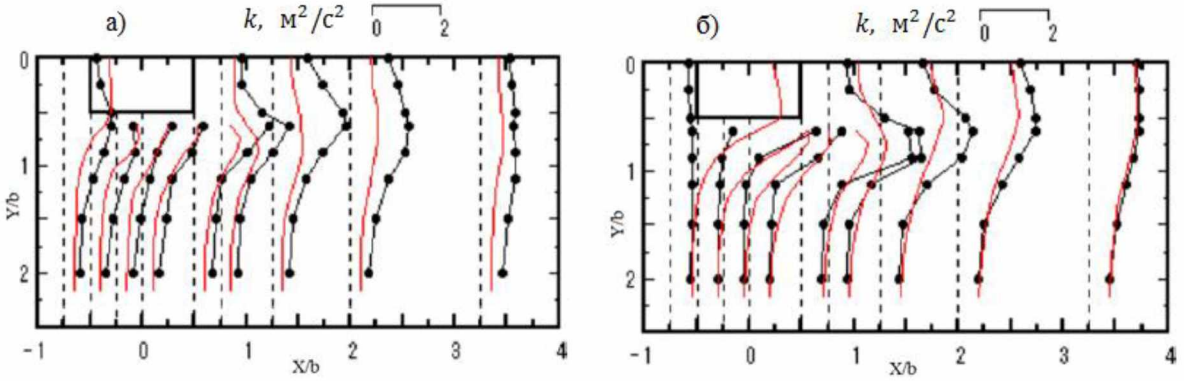


Рис. 7. Горизонтальные профили скоростейkприz/b =0,125 (слева) и $z/b = 1{,}25$ (справа).

Тестовая задача №2 – одиночное здание с прямоугольным основанием (см. рис.1). В этом случае расчётнаясетка имеларазмеры 67b×40b×61b(b=0,05м) по направлениям осей x, y иzсоответственно, что соответствует общему числу ячеек163 480.

Входные вертикальные профили продольной скорости u и k представлены на рис.8.Диссипация кинетической энергии турбулентности аппроксимирована при помощи формулы $\varepsilon = \sqrt{C_\mu} \cdot k \cdot \dfrac{du}{dz}$ в предположении, что генерация кинетической энергии турбулентности равна скорости её диссипации.

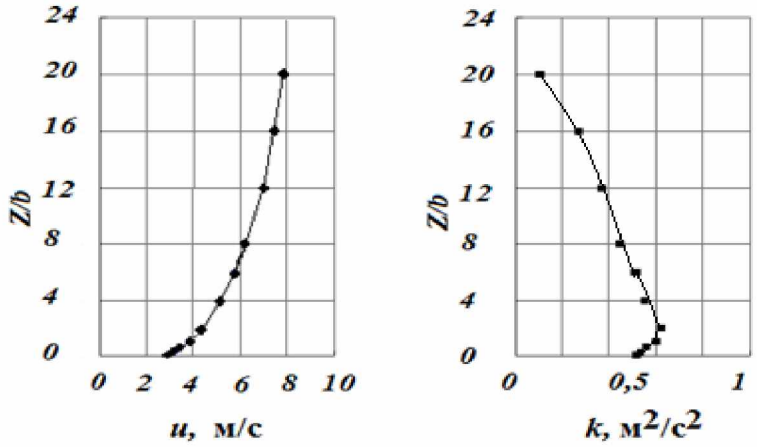


Рис. 8. Входные профили u и k .

Сравнение численных результатов с экспериментом приведено на рис 9-10. Согласие следует признать удовлетворительным, хотя в зоне рециркуляции за сооружением численные значение меньше экспериментальных данных.

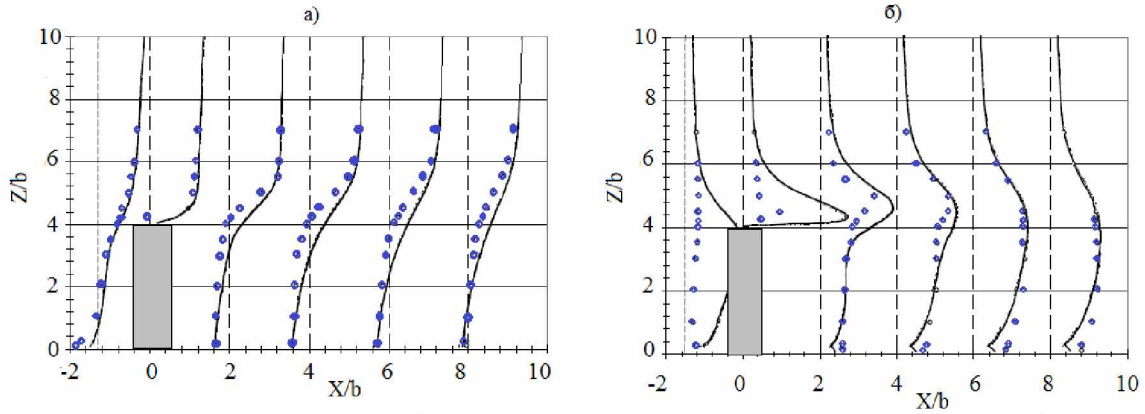


Рис. 9. Вертикальные профили скорости u и кинетической энергии турбулентности k.

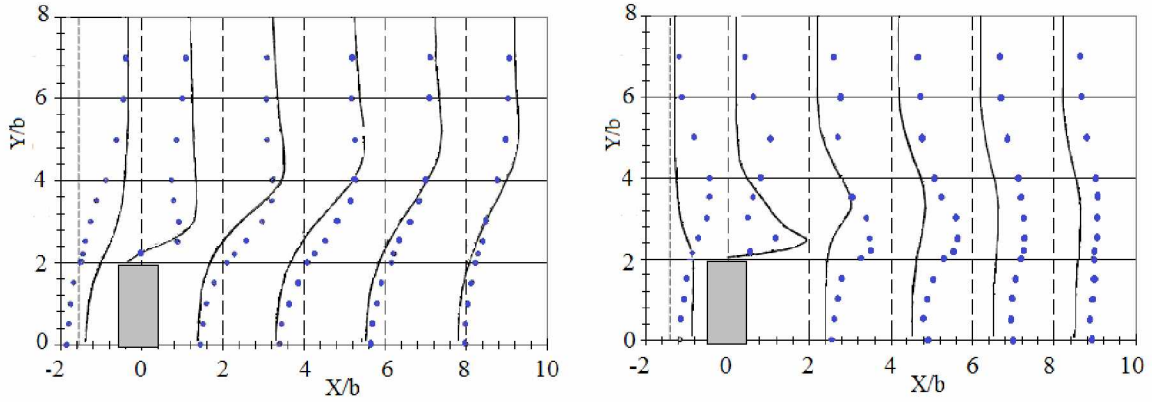


Рис. 10. Горизонтальные профили u и k при Z/b=0,25.

Тестовая задача №3 – система одинаковых кубоидов с линейным размером $D = 0{,}2$ м. Средняя скорость набегающего потока на уровне высоты куба была равна $U_D = 3{,}65$ м/с. Число Рейнольдса, рассчитанное по этой скорости и высоте куба Dравно 52 000.Расположение точек измерения (всего 120 точек) показаны на рис. 11.

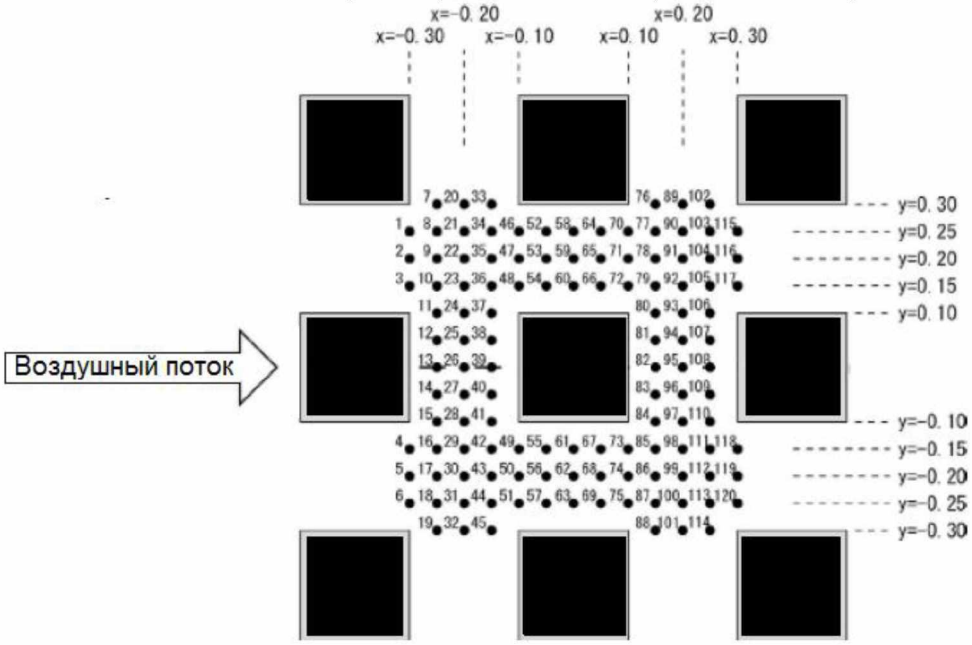


Рис. 11. Расположение точек измерения. Все величины указаны в м.

Расчетное поле представлено на рис. 12. Общее число ячеек в расчетной области равнялось 68×72×34=166 464.

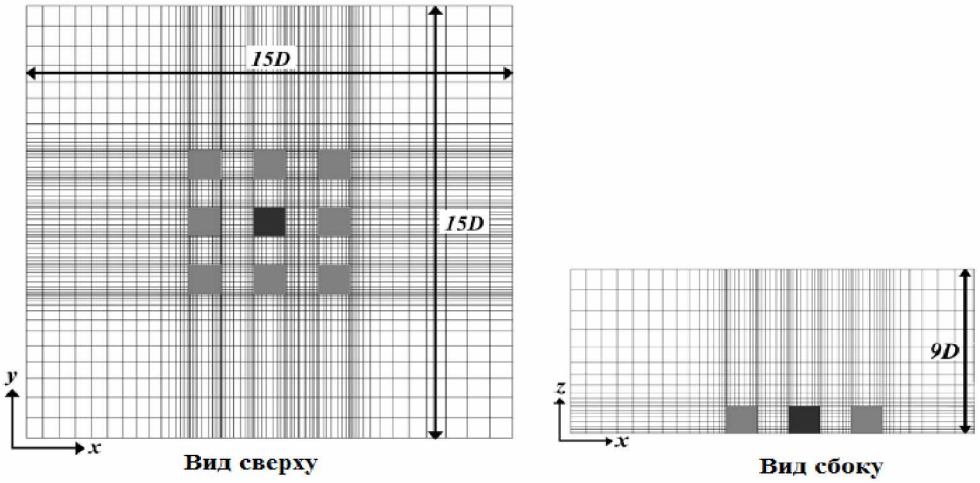


Рис. 12. Расчетная сетка.

Входной профиль продольной скорости uопределяется из экспериментальных данных, а кинетическая энергия турбулентности определяется из экспериментально измеренного профиля интенсивности турбулентности в направлении оси x. Скорость диссипации кинетической энергии турбулентности вычисляется из предположения, что генерация кинетической энергии турбулентности равна скорости её диссипации $P_k = \varepsilon$(см. рис.12.).

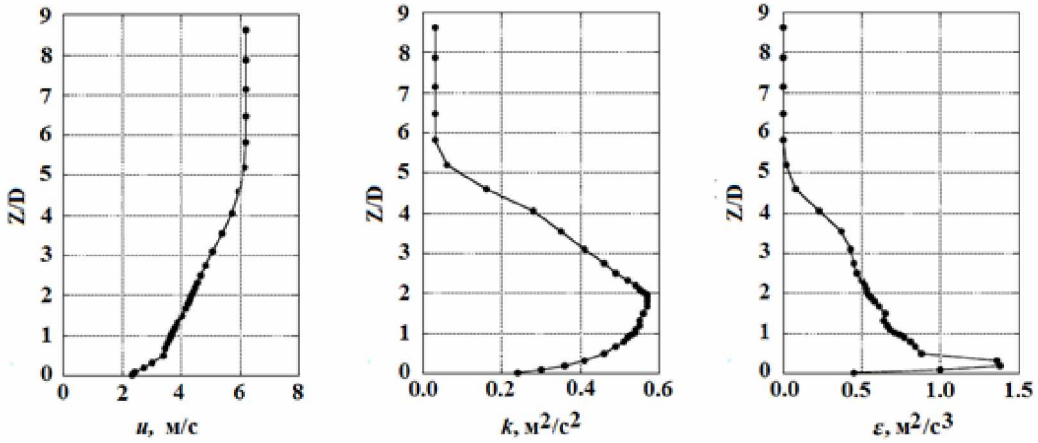


Рис. 12. Входные профили u , k и ε .

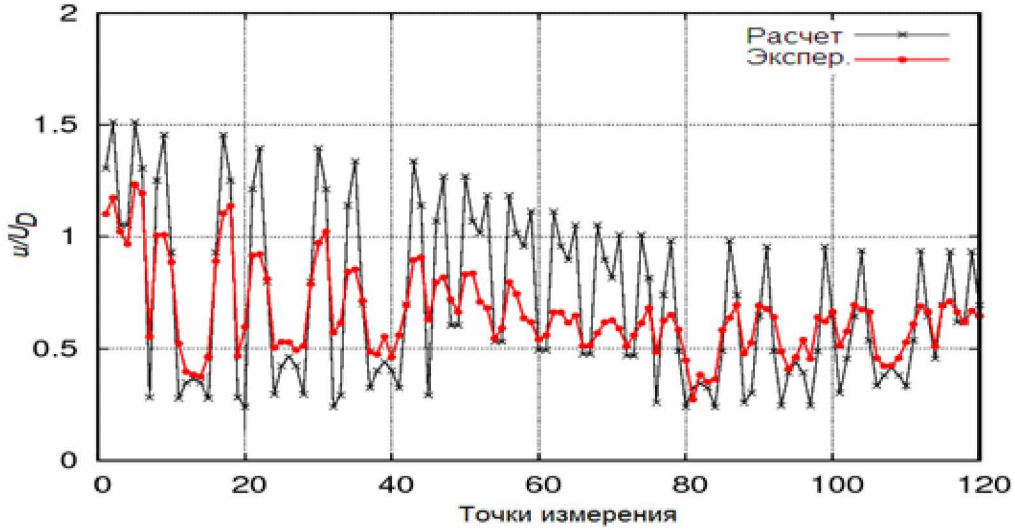


Рис.13. Сравнение численных и экспериментальных данных для $k-\varepsilon$ −модели.

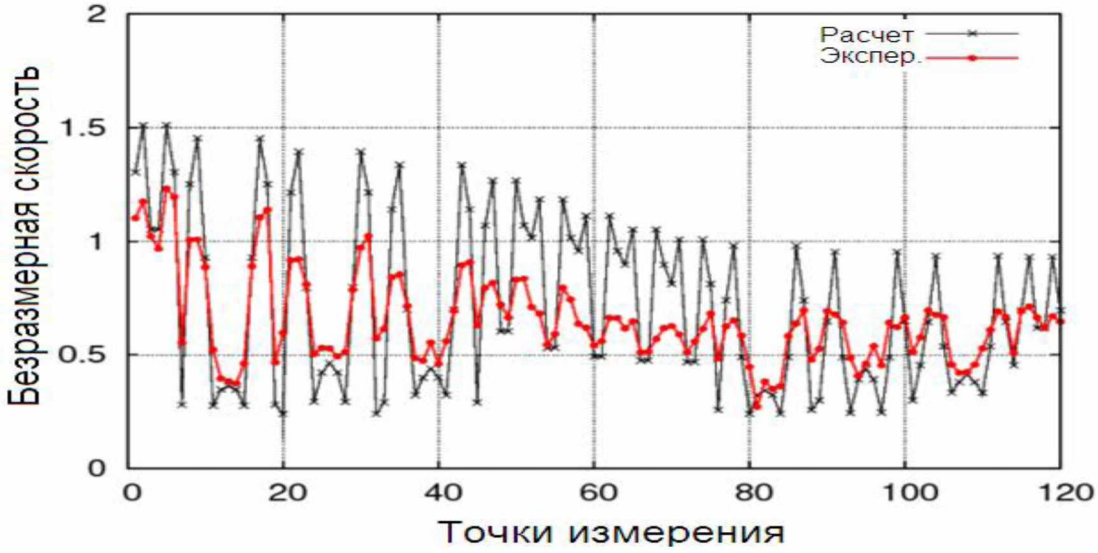


Рис. 14. Сравнение численных и экспериментальных данных для RNG $k-\varepsilon$ –модели

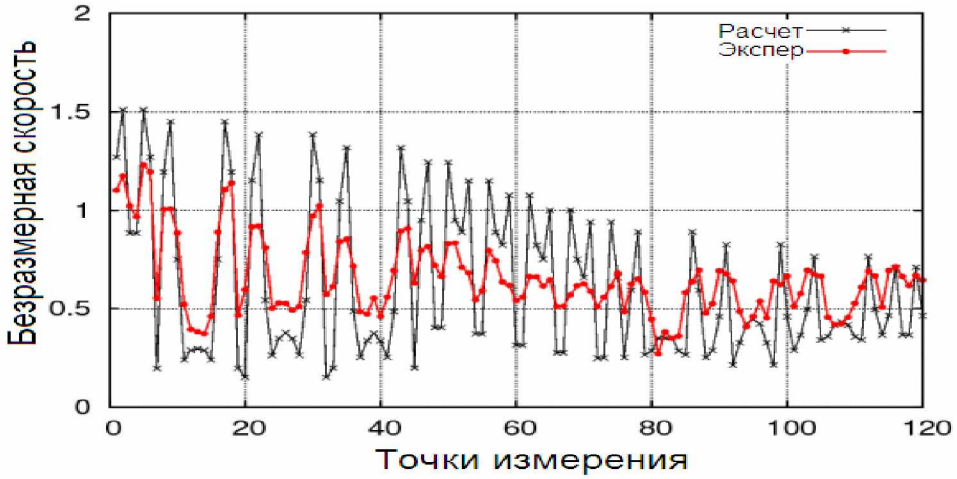


Рис.15. Сравнение численных и экспериментальных данных для nonlinear$k-\varepsilon$ –модели.

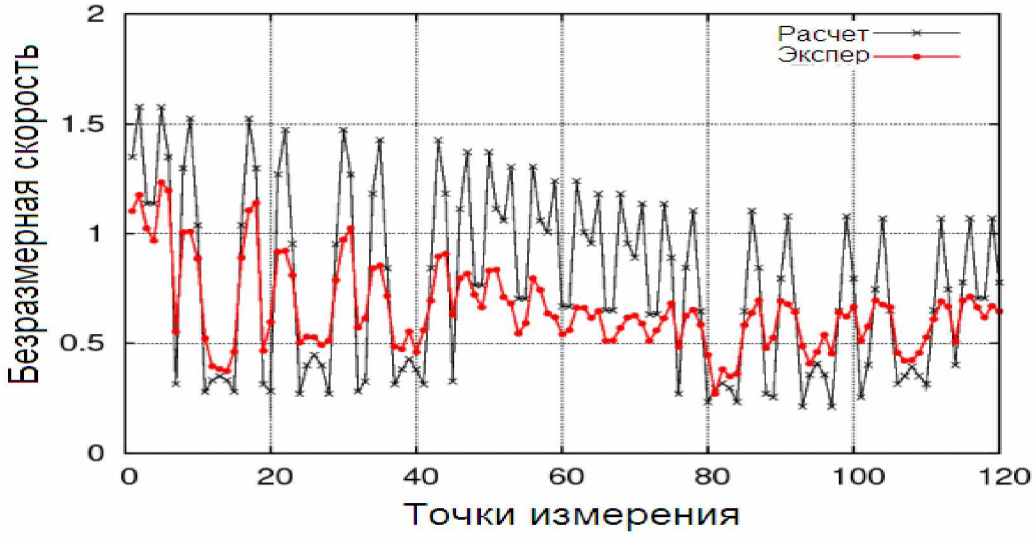


Рис.16. Сравнение численных и экспериментальных данных для realizable$k-\varepsilon$ –модели.

Заключение. В целом, точность предсказания при помощи открытого пакета OpenFOAM поля средней скорости вблизи различных призматических моделей одиночного здания является удовлетворительной. Численные расчеты, полученные при помощи различных двухпараметрических моделей турбулентности адекватно (с небольшими отклонениями) повторяют характер изменения экспериментальных данных. Однако, при моделировании обтекания блока одинаковых кубов, согласие между экспериментом и расчетом несколько ухудщается, что требует более точной детализации расчетной сетки, модели турбулентности, граничных условий и методов решения систем линейных алгебраических уравнений.

Список литературы

1. Мягков М. С., Алексеева Л. И. Особенности ветрового режима типовых форм городской застройки. Архитектура и современные информационные технологии. 1(26) 2014.Режим доступа: https://www.marhi.ru/AMIT/2014/1kvart14/myagkov/myagkov.pdf— Загл. с титул. экрана (дата доступа 06.09.2018).
2. Гадельшин В. К., Любомищенко Д. С. Математическое моделирование поля ветровых течений и распространения загрязняющих примесей в условиях городского рельефа местности с учетом $k-\varepsilon$ −модели турбулентности. Известия Южного федерального университета. 2010.Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/matematicheskoe-modelirovanie-polya-vetrovyh-techeniy-i-rasprostraneniya-zagryaznyayuschih-primesey-v-usloviyah-gorodskogo-reliefa— Загл. с титул. экрана (дата доступа 01.09.2018).
3. ГадельшинВ. К.,Сухинов А. А. Моделирование распространения загрязнения от автотранспорта в среде геоинформационной системы города. Известия Южного федерального университета. 2005.Режим доступа: https://cyberleninka.ru/article/n/modelirovanie-rasprostraneniya-zagryazneniya-ot-avtotransporta-v-srede-geoinformatsionnoy-sistemy-goroda— Загл. с титул. экрана (дата доступа 06.09.2018).
4. ГувернюкС. В., ГагаринВ. Г. Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на элементы ограждений высотных зданий. АВОК № 8. 2006. https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3426— Загл. с титул. экрана(дата доступа 09.09.2018).
5. Гутников В. А., Кирякин В. Ю., Лифанов И К., Сетуха А. В. Математическое моделировыание аэродинамики городской застройки, М., изд-во «Пасва», 2002, 244 с.
6. ДудичкинИ. В. Оценка биоклиматической комфортности городской застройки [Электронный ресурс]: учебное пособие / И.В Дуничкин, О.И. Поддаева, П.С. Чурин ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. — Электрон. дан. и прогр. (3,38 Мб). — Москва : Изд-во Моск. гос. строит. ун-та, 2016. — Режим доступа: http://mgsu.ru/resources/izdatelskaya-deyatelnost/izdaniya/izdaniya-otkr-dostupa/2016/OBKGZ.pdf — Загл. с титул. экрана (дата доступа 08.09.2018).
7. Сидоров А. М. Моделирование обтекания ветровыми потоками техногенных препятствий. Успехи современного естествознания. – 2006. - № 4-С.92-93.
8. Глазунов А. В. Численное моделирование турбулентности и переноса мелкодиспесной примеси в городских каньонах. Вычислительные методы и программирование. – 2018. – Т. 19. С. 17-37.
9. Вальгер С. А., Фёдоров А. В., Фёдорова Н. Н. Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохообтекаемых тел с использованием ПК ANSYS Fluent. Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18. №5. С. 27-40.
10. О. А. Сотникова, Л. В. Мурашова, А. И. Маленёв, А. Е. Пигарев, А. И. Драбо. Математическое моделирование векторного поля ветра при обтекании искусственных сооружений. Вестник ВГУ, Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2015, - № 4 – с. 22-30.

11. https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v4/. OpenFOAMv4UserGuide.

12. Ferziger J.H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics // Springer Verlag, 2002. – 423 p.

13. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics // Edinburg: Pearson Education Limited, 2007. – 517p.

14. Guidebook for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings. http://www.aij.or.jp/jpn/publish/cfdguide/index_e.htm

15. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости: Пер. с. англ. –М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152с.

16. Жайнаков А. Ж., Калеева А. К., Курбаналиев А. Ы. Моделирование стационарных отрывных течений в пакете OpenFOAM.Вестник Кыргызского государственного технического университета им. И. Разакова, Бишкек, Кыргызстан, №32, 2014 стр. 25-30.

17. Жайнаков А. Ж., Курбаналиев А. Ы., Калеева А. К., Ахунов Б. А. Численное моделирование трёхмерных отрывных течений. Вестник Кыргызского государственного технического университета им. И. Разакова, Бишкек, Кыргызстан, №33, 2014 стр. 535-538.

18. Жайнаков А. Ж., Курбаналиев А. Ы., Калеева А. К. Прогнозирование течения вокруг сооружения методом контрольных объемов. Вычислительные технологии т. 20. 2015, , Вестник КазНУ. №3 (86), Ч. II. 2015, с. 268-274.