

ФИЗИКА ИЛИМДЕРИ
ФИЗИЧЕСКИЕ НАУКИ
PHYSICAL SCIENCES

Калмурзаева А.Т.

ЧЕК АРА ШАРТТАРЫНЫН АГЫМГА ТИЙГИЗГЕН САНДЫК МОДЕЛИ

Калмурзаева А.Т.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВХОДНЫХ
ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА КАРТИНУ ТЕЧЕНИЯ**

A. Kalmurzaeva

**NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE OF THE INPUT
BOUNDARY CONDITIONS ON THE FLOW PATTERN**

УДК: 532.54

Бул иште, кире бериши жеринде чукул кеңейүүсү жана чыгуусунда конфузору бар үч өлчөмдүү каналдагы стационардык турбуленттүү агым каралган. Берилген класстагы агымдарды сандык моделдеширүү боюнча жеткиликтүү илимий адабияттарды анализдөө, чек ара шарттарын аныктоо жана эсептөө гидродинамикасынын каражаттары менен турмушка ашыруу азыркы учурга чейин толук чечилген эмес. Октук ылдамдыктын кирүү профилинин чукул кеңейүүчү үч өлчөмдүү каналдагы кысылгыс абанын агымына тийгизген таасири сандык моделдеширүүнүн негизинде изилденди. Стационардык турбуленттүү агымдарды изилдөө үчүн баштапкы теңдемелер катары стандарттык $k-\epsilon$ турбуленттик модели менен толукталган убакыт боюнча орточолонгон Навье-Стокс теңдемелери колдонулду. Сызыктуу эмес теңдемелер системасынын сандык чечүү OpenFOAM пакетинин simple Foam чечүүчү тиркемесинин жардамында жүргүзүлдү. Simple Foam чечүүчү тиркеме стационардык турбуленттүү агымдарды моделдеширүүгө арналган жана ылдамдык менен басымды айкалыштуруучу, белгилүү болгон SIMPLE алгоритмин колдонот. OpenFOAM7 пакетинин негизинде аткарылган сандык эсептөөлөрдүн жыйынтыктары эсептөө областынын кирүү чек арасындагы шарттарды аныктоо ыкмасы агымдын мүнөздөмөлөрүнө маанилүү таасир этерин көрсөттү жана бул нерсени ички рециркуляциялык агымдарды математикалык моделдеширүүдө эске алуу зарыл.

Негизги сөздөр: чукул кеңейүү, рециркуляциялык турбуленттүү агым, көлөмдөр ыкмасы, чек ара шарттары, алгоритм.

В данной работе рассмотрено стационарное турбулентное течение в трёхмерном канале с внезапным расширением на входе и конфузормым выходом. Анализ доступной научной литературы по численному моделированию данного класса течений показывает, что корректная постановка и реализация средствами вычислительной гидродинамики граничных условий до сих пор не решены в полной мере. Путём численного моделирования исследовано влияние входного профиля осевой скорости на картину течения несжимаемого воздуха в трёхмерном канале с внезапным расширением. В качестве исходных уравнений для описания стационарных турбулентных течений использовались осредненные по времени уравнения Навье-Стокса, дополненные со стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности. Численное

решение систем нелинейных уравнений проведено при помощи решателя simpleFoam пакета OpenFOAM. Решатель simpleFoam предназначен для моделирования стационарных турбулентных несжимаемых течений и использует известный алгоритм сопряжения скорости и давления SIMPLE. Результаты численных расчетов, выполненных на базе пакета OpenFOAM7 показывают, что способ задания граничных условий на входе в расчетную область оказывают существенное влияние на характеристики течения, что необходимо учитывать при математическом моделировании внутренних рециркуляционных течений.

Ключевые слова: внезапное расширение, рециркуляционное турбулентное течение, метод конечных объёмов, граничные условия, алгоритм.

In this paper, we consider a stationary turbulent flow in a three-dimensional channel with a sudden expansion at the entrance and a confuser exit. An analysis of the available scientific literature on numerical modeling of this class of flows shows that the correct formulation and implementation of boundary conditions by means of computational fluid dynamics has not yet been fully solved. The effect of the input axial velocity profile on the flow pattern of incompressible air in a three-dimensional channel with a sudden expansion was studied by numerical simulation. The time-averaged Navier-Stokes equations supplemented with the standard $k-\epsilon$ model of turbulence were used as the initial equations for the modeling of stationary turbulent flows. The numerical solution of systems of nonlinear equations is carried out using the simple Foam solver of the OpenFOAM package. The simple Foam solver is designed to simulate stationary turbulent incompressible flows and uses the well-known SIMPLE velocity-pressure coupling algorithm. The results of numerical simulations performed on the basis of the OpenFOAM7 package show that the method of setting the boundary conditions at the inflow to the calculated region has a significant impact on the flow characteristics, which must be taken into account during mathematical modeling of the internal recirculation flows.

Key words: Sudden expansion, recirculating turbulent flow, finite volume method, boundary conditions, algorithm.

Численное моделирование трёхмерного отрывного течения в прямоугольном канале с внезапным расширением по-прежнему представляет интерес для исследований, когда разрабатывается новый численный метод или проводится исследование те или иные

особенности турбулентного потока. При этом с точки зрения экономичности, результаты численного моделирования должны быть получены с помощью небольших вычислительных ресурсов, и обязательно привести к пониманию основных физических особенностей потока. Одним из классических примеров данного класса течений является экспериментальная работа [1], в которой эксперимента было изучение горения жидкой смеси воздуха и пропана в турбулентном слое смешения. В [2] представлены основные принципы интегрированной структуры, начиная с описания численных методов решения трехмерных течений несжимаемой жидкости, основанных на процедуре локального усреднения, до исследования структуры потока с помощью реконструкции вихревых линий и идентификации вихрей. Сообщается о нескольких результатах, касающихся аналитического ориентира, моделирования течений в ламинарных и зарождающихся переходных режимах и обнаружения вихревых структур. Также представлены предварительные результаты для сильно нестационарных течений.

Задача тестирования некоторых, применяемых при численном решении усредненных по Рейнольдса уравнений Навье-Стокса RANS моделей турбулентности рассмотрена в [3]. Проведено сравнение численных результатов с экспериментальными данными [1]. Особое внимание уделено на такие характеристики течения как форма, положение и размер зоны обратных токов. Большинство протестированных моделей имеют проблемы, описывающие сложную динамику разделения потоков в этих конкретных случаях.

Численное исследование влияния числа Рейнольдса на величину турбулентности и центра рециркуляционного вихря проведено в [4]. Результаты моделирования при различных числах Рейнольдса 12210, 50000 и 100000 показали, что, чем выше значение числа Рейнольдса, тем дальше от входа расположен центр. Также были установлена возрастание степени турбулентности и длины вихря. Кроме того, рост числа Рейнольдса приводит к образованию мелкозернистой смеси воздуха и пропана что повышает полноту сгорания топлива.

Числовое моделирование турбулентного течения с зонами рециркуляции в вышеуказанных работах проведено с использованием открытого пакета программ OpenFOAM. OpenFOAM [5] – это открытая система вычислительной гидродинамики, применяемая в различных областях аэро- и гидродинамики. Благодаря открытому исходному

коду на языке C++ многие полезные библиотеки и набор решателей свободно доступны пользователям, что делает пакет OpenFOAM все более популярной в различных областях прикладной науки [6-9]. В OpenFOAM можно найти множество заранее подготовленных решателей, предназначенные для численного моделирования широкого спектра задач – от турбулентного реагирующего течения жидкости с учетом теплопередачи и излучения, до динамики твердого тела и электромагнетизма.

Целью работы является моделирование влияния входных граничных условий на характеристики отрывного течения несжимаемой жидкости в канале с внезапным расширением. Численные расчеты проведены на базе руководства pitzDaily пакета OpenFOAM, использующее решатель simple Foam и содержит всю необходимую исходную информацию по моделированию рассматриваемой задачи.

2. Математическая модель. Геометрия рассматриваемой задачи приведена на рисунке 1. Линейные размеры расчетной области указаны в единицах высоты уступа $H=0.0254$ м, геометрическая пропорция не сохранена.

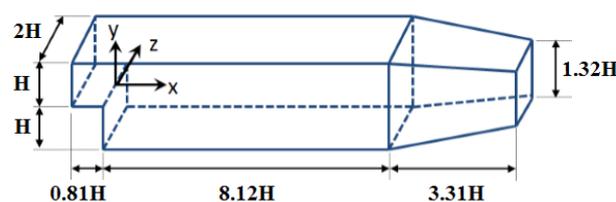


Рис. 1. Геометрия задачи и принятая система координат.

Рассматриваемый класс турбулентных стационарных течений описывается при помощи осредненных по времени уравнений Навье-Стокса [10-13]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2};$$

$$i = 1,2,3; j = 1,2,3; \quad (1)$$

где $x_i - i$ – координата, t – время, $u_i - i$ – компонент вектора скорости, p – давление, $f_i - i$ – компонент объемной силы, ρ – плотность жидкости, ν – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Для учета турбулентных пульсаций на характеристики среднего течения была использована стандартная $k-\varepsilon$ –модель турбулентности [10, 11].

Дискретная форма этих уравнений (1) получена методом конечных объемов [10, 11, 14].

Приложение blockMesh пакета OpenFOAM использовано для создания расчетной сетки с

соответствующим сгущением сетки около внезапного расширения и ближе к выходу из канала

(рис. 2). Вся расчетная область разделена на 122250 гексаэдров.

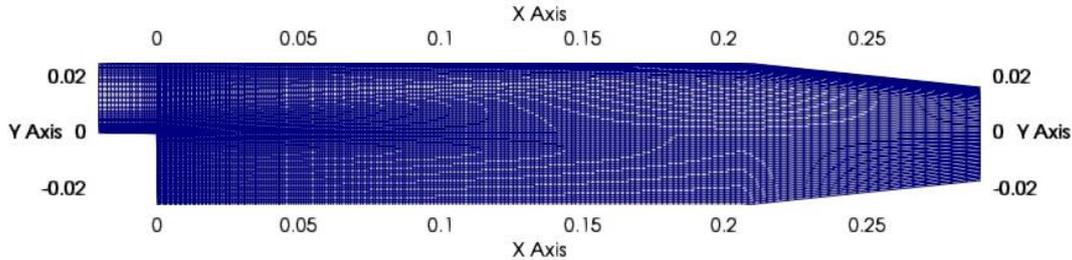


Рис. 2. Неравномерная расчетная сетка.

При численном интегрировании каждого уравнения системы (1) следует определить граничные условия для всех компонент скорости U , давления p , кинетической энергии турбулентности k скорости её диссипации ε . На выходе из канала продольные градиенты величин U , k и ε , а также давление p считались равными нулю. Граничные условия на твердых стенках расчетной области ставились при помощи аппарата пристеночных функций [10, 11].

Входные граничные условия для осевой составляющей скорости U_x задавались двумя способами. В первом случае скорость была равна постоянному значению 12.76 м/с, а во втором случае она определялась по экспериментальным данным работы [1].

Численное решение систем нелинейных уравнений выполнено с помощью решателя simpleFoam пакета OpenFOAM, предназначенного для моделирования стационарных турбулентных течений и

использующий хорошо известную процедуру совместного решения уравнений, связанных через скорость и давление SIMPLE [10, 11, 14]. Дополнительные сведения о методах дискретизации, граничных условиях и методах решения можно получить в [5].

Результаты и обсуждение. Результаты численных расчетов представлены на следующих рис. 3–7. На рис. 3аб представлены изолинии вектора скорости в плоскости xOy при $z = 0$ для постоянного профиля (рис. 3а) и переменного профиля (рис. 3б) входной скорости. Здесь отчетливо видны особенности течения в канале с внезапным расширением, а именно, образование большой рециркуляционной возвратной зоны за уступом и малой, вторичной зоны обратных токов в левом нижнем углу расчетной области в плоскости внезапного расширения, и конечно же, поджатие течения около конфузорной части канала.

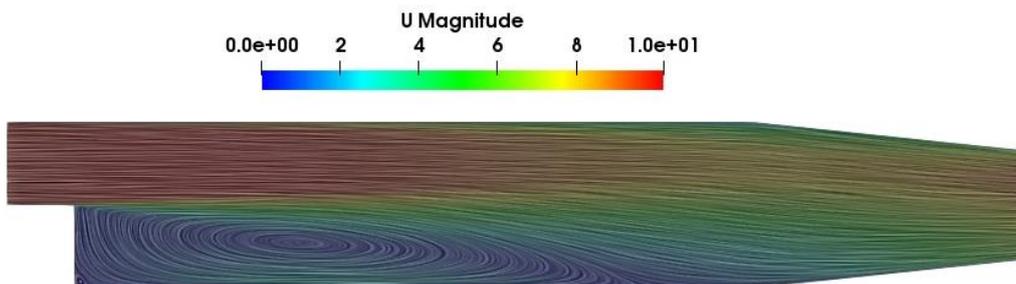


Рис.3а. Изолинии вектора скорости для первого случая.

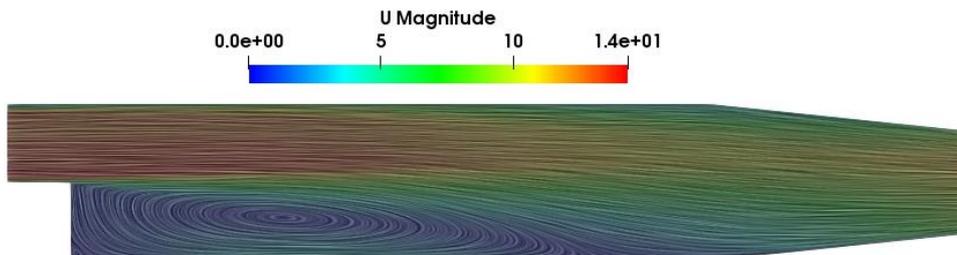


Рис. 36. Изолинии вектора скорости для второго случая.

Далее, на рис. 4-7 представлены результаты численного моделирования влияния входных условий на характеристики течения. Левые части каждого рисунка соответствуют постоянному значению $U_x = 12.76$ м/с, а правые части экспериментальному профилю U_x входной осевой скорости соответственно.

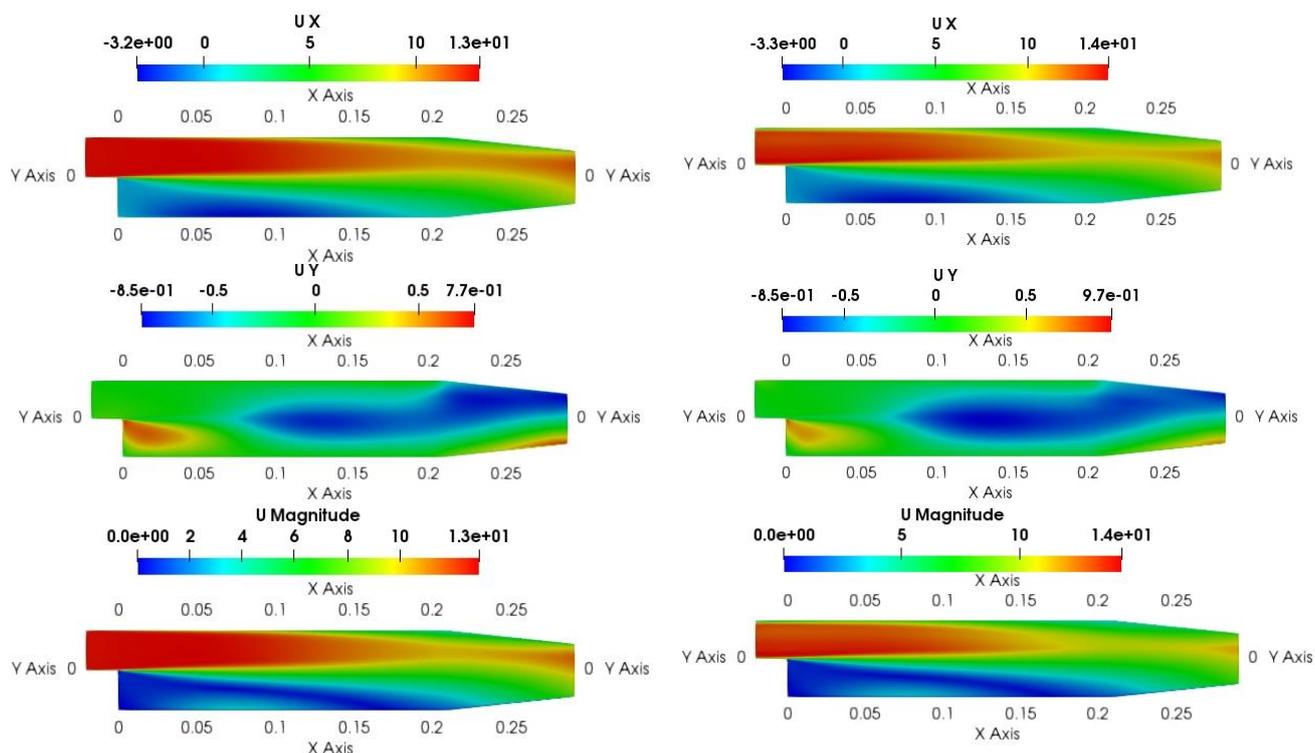


Рис. 4. Поле скорости.

Массовый расход воздуха во всех численных расчётах был постоянным, равным $Q=0.000254$ кг/с. Внимательное сравнение левых и правых частей этих рисунков показывает, что условие на входе для продольной скорости U_x значительно влияет на общую картину течения несмотря на то, что расход воздуха в обоих случаях одинаковый. А именно, область положительных значений скорости U_y меньше по сравнению с первым случаем (рис. 4).

В том случае, когда на входе задается переменный, соответствующий экспериментальным данным

профиль скорости U_x максимальные значения компонента и вектора скорости, кинетической энергии турбулентности и (правые части рис. 4 и рис. 6) превышают соответствующие значения этих же величин при первом, постоянном профиле входной скорости U_x (левые части рис. 4 и рис. 6). Однако, для полей давления (рис. 5) и скорости диссипации кинетической энергии турбулентности (рис. 7) ситуация противоположная. Область отрицательных давлений во втором случае уменьшается по сравнению с первым случаем (рис. 5).

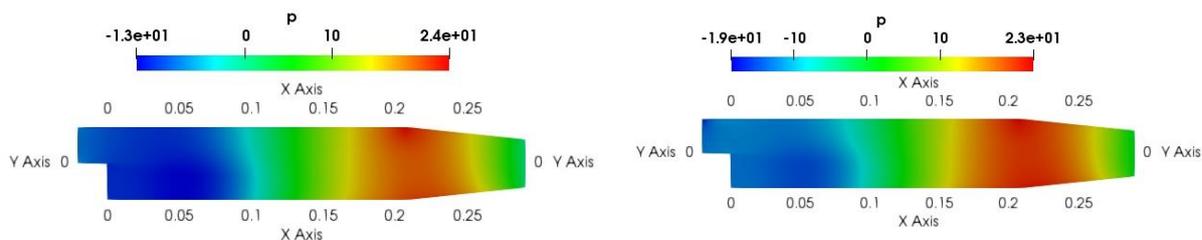


Рис. 5. Поле давления.

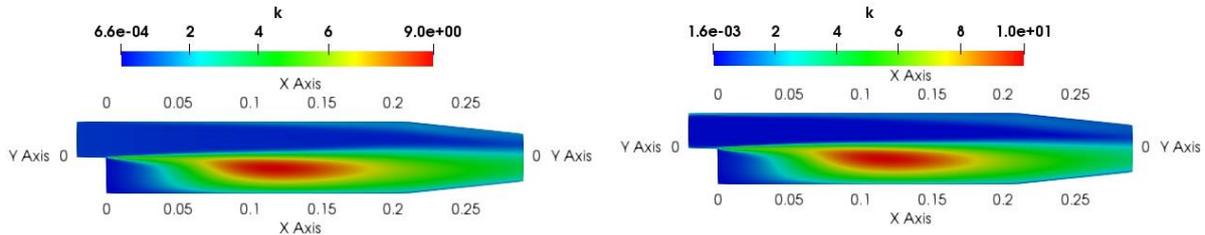


Рис. 6. Поле кинетической энергии турбулентности.

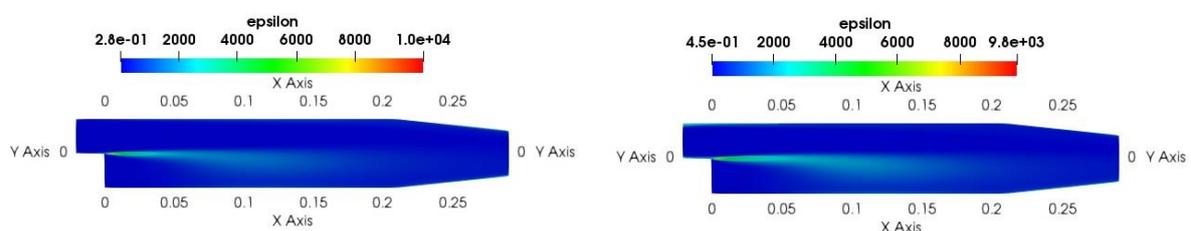


Рис. 7. Поле скорости диссипации кинетической энергии турбулентности.

Выводы. Рассмотрено численное моделирование влияния входного профиля скорости потока на картину течения в трёхмерном канале с внезапным расширением. Результаты численных расчетов, выполненных на базе пакета OpenFOAM7 показывают, что способ задания граничных условий на входе в расчетную область оказывают существенное влияние на характеристики течения, что необходимо учитывать при математическом моделировании внутренних отрывных течений.

Литература:

- Daily C.J.W. and Pitz R. W. Combustion in a turbulent mixing layer formed at a rearward facing step. *AIAA journal*, 21(11):1565–1570, 1983.
- De Stefano G., F.M. Denaro and G. Riccardi. Analysis of 3D backward-facing step incompressible flows via a local average-based numerical procedure. *International journal for Numerical methods in Fluids*. 28: 1073-1091, 1998.
- Furbo E. Evaluation of RANS turbulence models for flow problems with significant impact of boundary layers. Master's thesis. Available at <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:379743/FULLTEXT01.pdf>. Accessed 25.05.2021.
- Suhani, Syamsuri. Characteristic of vortex in a mixing layer formed at nozzle PitzDayli using OpenFOAM. *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*. VOL. 9, NO. 9, SEPTEMBER 2014
- <https://cfd.direct/openfoam/user-guide-v7/>. OpenFOAM 7.0 User's Guide. Access data 05.05.2021.
- Жайнаков А.Ж., Курбаналиев А.Ы. Математическое моделирование задачи прорыва дамбы. *Вычислительные технологии*. - Новосибирск, 2013. Т. 18, №3, с. 12-21.
- Жайнаков А.Ж., Курбаналиев А.Ы. Верификация открытого пакета OpenFOAM на задачах прорыва дамб. *Теплофизика и аэромеханика / Институт теплофизики СО РАН, - Новосибирск*, 2013. Т. 20, №4, с. 461-472.
- Kurbanaliev, A.R. Maksutov, G.S. Obodoeva and B.R. Oichueva. Using OpenFOAM Multiphase Solver interFoam for Large Scale Modeling. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2019, WCECS 2019, October 22-24, 2019, San Francisco, USA*. Available at: http://www.iaeng.org/publication/WCECS2019/WCECS2019_pp366-370.pdf. Accessed 25.05.2021.
- Курбаналиев А.Ы., Ойчуева Б.Р., Калмурзаева А.Т., Жайнаков А.Ж., Култаев Т.Ч. Критическое сравнение различных версий пакета OpenFOAM на задаче моделирования водослива. *Вычислительные технологии*. – Новосибирск, 2021. Т. 26, №2, с. 44-57.
- Versteeg H.K., Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd Edition. Pearson Education Limited, 2007, 503p.
- Ferziger J.H., Peric M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer Verlag, 2002–42.
- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. *Гидродинамика*. - М.: Наука, 1986. – 736с.
- Лойцянский Л.Г. *Механика жидкости и газа*. - М.: Дрофа, 840 с.
- Патанкар С.В. *Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости*: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат. – 152с.
- Абдылдаев К.К. Численное исследование напряженно-деформированного состояния структурно неоднородных бортов карьеров. *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2014. №. 2. С. 3-8.
- Урманбетов Р.Дж., Дыйканова А.Т., Турганбаева А.Б. Численное моделирование обтекания цилиндра вязким потоком. *Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана*. 2018. №. 2. С. 16-19

