

**Национальная академия наук Кыргызской Республики  
Институт машиноведения и автоматики**

**Кыргызско-Российский Славянский университет  
им. Б.Н. Ельцина**

Диссертационный совет Д 05.21.631

На правах рукописи  
УДК:519.6:004(575.2) (043)

Турганбаева Акпари Балтабаевна

**«Создание алгоритма для математического моделирования течений над  
сложной подстилающей поверхностью»**

05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

БИШКЕК – 2022

**Работа выполнена на кафедре информационные системы и программирование Ошского государственного университета.**

**Научный руководитель:** Курбаналиев Абдикерим  
Ырысбаевич, доктор физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой естественных наук и математики Ошского государственного университета

**Официальные оппоненты:** \_\_\_\_\_,  
профессор, профессор  
\_\_\_\_\_  
университета  
\_\_\_\_\_  
доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой \_\_\_\_\_ университета

**Ведущая организация:** Кафедра \_\_\_\_\_ - и \_\_\_\_\_  
университет

Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ года в \_\_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 05.21.631 по защите диссертаций на соискание ученой степени доктора (кандидата) физико-математических и технических наук при Институте машиноведения и автоматике Национальной академии наук Кыргызской Республики и Кыргызско-Российском Славянском университете им. Б.Н. Ельцина по адресу 720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265, ауд. 349. Идентификационный код онлайн трансляции защиты диссертации <https://vc.vak.kg/b/052-dry-zfv-dd6>.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Национальной академии наук Кыргызской Республики (720071, г. Бишкек, пр. Чуй, 265), Кыргызско-Российского Славянского университета им. Б.Н. Ельцина (720000, г. Бишкек, ул. Киевская, 44), Ошского государственного университета (723500, г. Ош, ул. Ленина, 331) и на сайте по адресу [www.imash.kg](http://www.imash.kg). E-mail: [diss\\_ima@mail.ru](mailto:diss_ima@mail.ru).

Автореферат разослан «\_\_»\_\_202\_\_г.

Учёный секретарь  
диссертационного совета,  
к.ф.-м.н., с.н.с.

Керимкулова Г. К.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Точное и надежное моделирование ветрового потока современными средствами вычислительной гидродинамики над природным сложным рельефом важно для широкого спектра применений, включая перенос и рассеивание загрязняющих веществ, оценку ресурсов энергии ветра. Важной и актуальной проблемой является обеспечение долговечности линий электропередач в горных местностях Киргизской Республики. Известно, что для защиты ЛЭП высоких напряжений от пылевидных частиц, приводящих к нежелательному загрязнению изоляции ЛЭП, обычно сооружаются защитные экраны или используются естественные особенности рельефа. Другой важной проблемой является обеспечение комфортных условий проживания населения в городской местности, где определяющими источниками вредных примесей являются автомобильные выхлопные газы и выбросы от отопительных систем, построенных без учета розы ветров.

Насущная потребность в совершенствовании методов моделирования трёхмерных турбулентных отрывных течений и переноса экологически вредных примесей над сложными природными холмами определяют актуальность темы исследования.

За последние 50 лет было проведено очень большое количество CFD-исследований ветрового потока над холмами. Проблемы распространения экологически вредных примесей рассмотрены в работах Марчука Г. И. (1982), Truppi, L. E., Holzworth, G. C. (1984), Пененко В. В. (1985), Белоцерковского О. М. (2000), Каменецкого Е. С. (2009), F. Paraggio, G. Crasto (2015).

**Связь темы диссертации с приоритетными научными направлениями, крупными научными программами (проектами), основными научно-исследовательскими работами, проводимыми образовательными и научными учреждениями.** Часть работы выполнена в рамках научно-исследовательского проекта «Создание программного обеспечения геоинформационной системы города и математическое моделирование влияния естественного препятствия на распространения экологически вредных примесей (на примере горы Сулайман г. Ош)» финансируемого за счет Министерства образования и науки Кыргызской Республики за 2018г.

**Целью исследования** является разработка вычислительных алгоритмов и технологий для моделирования сложных трехмерных турбулентных течений на неструктурированных сетках над подстилающей поверхностью на примере обтекания горы Сулайман, г. Ош в рамках пакета OpenFOAM.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Определение наилучших стандартных алгоритмов и методов двухпараметрических моделей турбулентности в OpenFOAM для задач прогнозирования средних характеристик течения и концентрации пассивной

примеси при обтекание неровных поверхностей.

2. Оценка современного состояния вычислительных алгоритмов и методов, реализованных в OpenFOAM, в качестве практических инструментов для прогнозирования средних характеристик течения и концентрации пассивной примеси при обтекание неровных поверхностей.

3. Разработка алгоритма и метода автоматического построения трёхмерной неструктурированной расчетной сетки с помощью геоинформационной системы GRASS GIS8 и утилиты snappyHexMesh пакета OpenFOAM для задачи обтекания воздушным потоком горы Сулайман г. Ош, Кыргызстан.

4. Создание комплекса программных средств (passiveScalarPimpleFoam, Ubuntu 20.04 LTS, GRASS GIS8, Python, Gnuplot), ориентированный на численную реализацию задачи моделирования обтекания естественного препятствия с учетом распространение экологически вредных примесей.

5. Исследование влияния различных схем дискретизации конвективного члена в уравнении переноса пассивной примеси на сходимость итерационного процесса (на примере горы Сулайман, г. Ош).

### **Научная новизна полученных результатов.**

1. Изучены наилучшие стандартные алгоритмы и методы для двухпараметрических моделей турбулентности в OpenFOAM для задач прогнозирования средних характеристик течения и концентрации пассивной примеси при обтекание неровных поверхностей. Дана практическая рекомендация не использовать RNGkEpsilon и kEpsilonLopesdaCosta модели турбулентности в задаче моделировании обтекания естественного препятствия – горы Сулайман.

2. Обнаружено, что при численном моделировании обтекания трёхмерного осесимметричного холма с использованием 5 моделей турбулентности, расчеты показывают, что скорость набегающего потока по мере приближения к вершине холма возрастает и достигает максимального значения – 39 м/с, что больше максимальной входной скорости  $u_{max} = 27.5$  м/с примерно на 42%. Другими словами, происходит ускорение ветра на вершине холма, поэтому рекомендуется линии ЛЭП не следует располагать в этих точках во избежание больших ветровых нагрузок.

3. Предложен алгоритм и метод автоматического построения трёхмерной неструктурированной расчетной сетки для задач обтекания естественного препятствия горы Сулайман, г. Ош.

4. Предложен и обоснован комплекс программных средств (passiveScalarPimpleFoam, GRASS GIS8, Python, Gnuplot), ориентированный на численную реализацию задачи влияния естественного препятствия на распространение экологически вредных примесей. Установлено, что концентрация пассивной примеси меньше на 4.5% в наветренной стороне второго

холма по сравнению с подветренной стороной первого холма в случае численного моделирования нестационарного обтекания периодического холма воздушным потоком.

5. Впервые проведен численный расчет стационарного обтекания естественного препятствия горы Сулайман, г. Ош с учетом распространения пассивной примеси. Обнаружено, что среди использованных 17 различных схем, vanLeer и limitedVanLeer схемы дают совершенно одинаковые значения концентрации пассивной примеси в трёх реперных точках. Показано, что среды рассмотренных четырёх NVD схем, по времени, затраченному на одну итерацию самой эффективной, оказалась схема SFCD - это время было равно 0.553с, 2.294с и 3.799с на трёх расчетных сетках Mesh1, Mesh2 и Mesh3 соответственно. Расчеты показывают, что из трех реперных точек концентрация пассивной примеси в точках P2 и P3 примерно на порядок меньше значений концентрации в точке P1. Поэтому, можно утверждать, что степень экологической комфортности в точках P2 и P3 на порядок выше, чем в точке P1.

**Практическая значимость полученных результатов.** Полученные результаты диссертационной работы при наличии фактической информации о метеорологических параметрах окружающей среды могут быть использованы в разработке территориальной автоматизированной системы контроля выбросов загрязнителей в атмосферу и вносят существенный вклад в математическое моделирование трехмерных атмосферных течений с учетом переноса экологически вредных примесей. Следует особо подчеркнуть верификацию пакета OpenFOAM на разнообразных задачах моделирования атмосферных течений и развитие подробного документирования пакета.

### **Основные положения диссертации, выносимые на защиту.**

1. Результаты использования предложенного комплекса программных средств (passiveScalarPimpleFoam, Ubuntu 20.04 LTS, GRASS GIS8, Python, Gnuplot), позволяющий численную реализацию задачи моделирования обтекания естественного препятствия с учетом распространение экологически вредных примесей с последующей визуализацией результатов расчетов. документирования пакета. в точке P1. больших ветровых нагрузок.

2. Алгоритм и метод автоматического построения трёхмерной расчетной сетки с помощью геоинформационной системы GRASS GIS8 и snappyHexMesh утилиты пакета OpenFOAM для задачи обтекания воздушным потоком горы Сулайман г. Ош, Кыргызстан.

3. Результаты моделирования влияния различных схем дискретизации конвективного члена в уравнении переноса пассивной примеси на сходимость итерационного процесса (на примере горы Сулайман, г. Ош).

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** обеспечивается: корректной постановкой задачи, обоснованным использованием

методов математического моделирования и программирования, численных методов, достижений современной вычислительной системы, достаточным объемом проведенных вычислительных экспериментов и сравнением полученных численных результатов и соответствующими экспериментальными и расчетными данными.

**Личный вклад соискателя.** Диссертация является результатом самостоятельных исследований, выполненных автором. Личный вклад автора состоит в постановке и определении цели работы, выборе методов достижения поставленной цели, проведении исследований, анализе полученных результатов и формулировке выводов, публикации статей. В обсуждении результатов принимали участие д.ф.–м.н., профессор, академик НАН КР Жайнаков А. Ж., научный руководитель, д.ф.–м.н., доцент Курбаналиев А. Ы., д.ф.–м.н., профессор Сатыбаев А. Ж., к.п.н., доцент Мадраимов С. М.

**Апробация результатов исследований.** Полученные в ходе выполнения данной диссертационной работы результаты докладывались на следующих международных, республиканских конференциях и семинарах:

- III International Scientific Conference. APITECH-III 2021: Applied Physics, Information Technologies and Engineering. 24 September - 3 October 2021, Krasnoyarsk, Russia.
- 5th International Conference on Advances in Natural and Applied Sciences-ICANAS-2021, Ibrahim Chechen University, Turkey, Agri, 21-23 September 2021.
- XIV -XV Международная Азиатская Школа-семинар «Проблемы оптимизации сложных систем». Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН (Россия, г. Новосибирск), Новосибирский государственный университет (Россия, г. Новосибирск), Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК (Республика Казахстан, г. Алматы) при поддержке Сибирской Российской секции R8 IEEE (Россия, г. Новосибирск), Институт математики НАН КР (Киргизия, г. Бишкек). 20 июля - 31 июля 2018 г., пансионат "Отель Евразия" озеро Иссык-Куль, Кыргызская Республика, Академгородок, Новосибирск, Россия, 26-30 августа, 2019.
- Международная научная конференция «Актуальные проблемы и перспективы геологии, горного дела и образования» посвященная к 80-летию Геологической службы Кыргызской Республики Бишкек, Кыргызстан, 04-06 октября 2018 года.

**Полнота отражения результатов диссертации в публикациях.** Основные результаты исследований опубликованы в 11 научных статьях и 1 авторском свидетельстве, в том числе в научных журналах за пределами Кыргызской Республики, которые входят в базы данных Scopus (1), РИНЦ (2).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, практических рекомендаций, библиографии и приложений. Работа содержит 145 страниц текста, 50 рисунка, 22 таблиц, 134 библиографических ссылок и 5 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, приведены цели и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы. Анализируются современные подходы в моделировании турбулентных атмосферных течений, их преимущества и недостатки. Кратко описаны структура и основное содержание диссертации по главам.

**В главе 1 — Обзор литературы** проведен обзор литературы по современным методам моделирования турбулентных атмосферных течений. Проведен анализ доступной научной литературы по рассматриваемой теме диссертации. Описаны наиболее распространенные модели атмосферной турбулентности, используемые для замыкания усреднённых по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса.

Математическое моделирование рассматриваемых задач основано на уравнениях неразрывности, переноса количества движения и пассивной примеси которые вместе образуют усреднённых по Рейнольдсу систему уравнений Навье-Стокса. Эта система для несжимаемого течения при отсутствии массовых сил имеет следующий вид Ferziger J. H., Peric (2002):

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{u}_i) = 0; \frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j + \rho \overline{u'_i u'_j}) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (T \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

где  $\bar{u}_i$  — компоненты средней скорости,  $\rho$  — плотность,  $T$  — концентрация пассивной примеси,  $\bar{p}$  — среднее давление,  $\bar{\tau}_{ij} = \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$  — тензор вязких напряжений, связанный с молекулярной вязкостью  $\mu$ ,  $\rho \overline{u'_i u'_j}$  — напряжения Рейнольдса, требующие моделирования. При наличии внешних сил эти уравнения необходимо дополнить соответствующими членами.

Учет турбулентных пульсаций на гидродинамику течения базировался на двухпараметрических моделях турбулентности.

**Во главе 2 — Методология и методы исследования** рассмотрены методы дискретизации обобщенного уравнения переноса для обобщенной переменной на основе метода контрольных объемов в рамках пакета OpenFOAM.

**Объектом исследования** является трехмерные турбулентные атмосферные течения.

**Предметом исследования** является численное исследование влияния естественного препятствия на распространение экологически вредных примесей.

Дан краткий обзор существующих программных средств, приведены основные критерии отбора выбранного пакета для моделирования, выделены принципы построения задач согласно идеологии пакета OpenFOAM.

Проведённый **обзор литературы** и рассмотрение **методологии и метода исследования** показал, что согласно работе F. Paraggio, G. Crasto (2015), можно успешно провести разработку вычислительных алгоритмов и технологий для моделирования сложных трехмерных турбулентных течений на неструктурированных сетках над подстилающей поверхностью на примере обтекания горы Сулайман, г. Ош в рамках пакета OpenFOAM.

**В главе 3 – Математическое моделирование течений над сложной подстилающей поверхностью** рассмотрены задачи вычислительной аэродинамики обтекания неровных поверхностей с учетом распространения экологически вредных примесей.

**Задача №1. Обтекание одиночного холма.** Рассматривается турбулентный поток несжимаемого воздуха над одиночным холмом (см. рисунок 1) в двумерной постановке, который входит в расчетную область слева и выходит из неё справа [[NASA Turbulence Modelling Resource, 2021](#)].

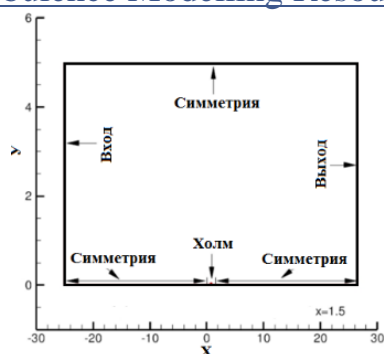


Рисунок 3.4 -Геометрия задачи и граничные условия

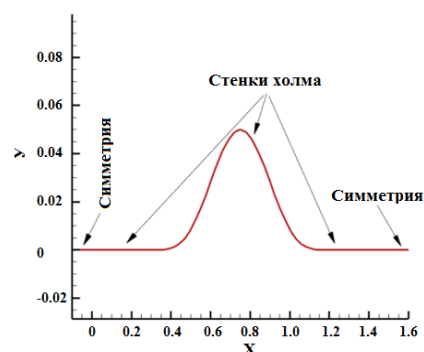


Рисунок 3.5 – Увеличенная окрестность холма

Целью рассмотрения этой задачи является выбор подходящей модели турбулентности, эффективного алгоритма и метода моделирования обтекания холма. Проверка достоверности полученных численных результатов проведено путем сравнения с соответствующими численными данными.

Число Маха было равно  $M=0.2$ , а число Рейнольдса, рассчитанное через характерную скорость  $69.44$  м/с, коэффициент кинематической вязкости  $\nu = 2.31 \times 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с и длину расчетной сетки в  $1$  м равно  $3 \times 10^6$ .

Численные результаты получены для различных разновидностей стандартной  $k - \epsilon$  и  $k - \omega$  моделей турбулентности, а именно RNGkEpsilon, kEpsilonLopesdaCosta, kEpsilonPhitF, kOmega, kOmegaSST. Кроме того, модель SpalartAllmaras тоже рассматривалась. Сравнение результатов численных расчетов с соответствующими данными программ CFL3D и FUN3D приведены на рисунках 3.6-3.9. Маркеры представляют результаты численных расчетов



полученных при помощи пакетов CFL3D (рисунки 3.6 и 3.7) и FUN3D (рисунки 3.8 и 3.9).

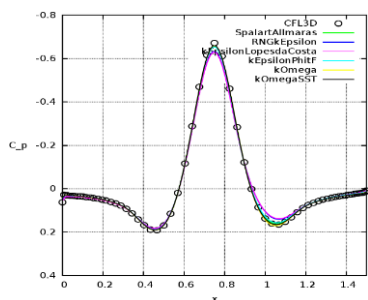


Рисунок 3.6 - Коэффициент давления для программы CFL3D

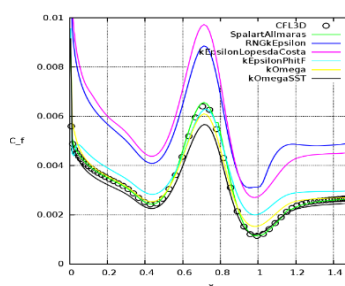


Рисунок 3.7 - Коэффициент подъёма для программы CFL3D

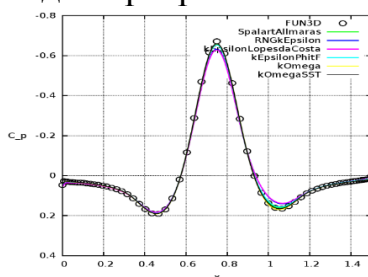


Рисунок 3.8 - Коэффициент давления для программы FUN3D

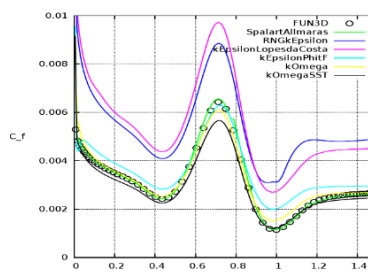


Рисунок 3.9 - Коэффициент подъёма для программы FUN3D

Как видно из вышеприведенных рисунков, численные данные, полученные при помощи пакетов OpenFOAM, CFL3D и FUN3D по коэффициенту давления  $C_p$  практически совпадают, если не считать небольшие отличия в рециркуляционной зоне после холма. Однако по коэффициенту подъёма  $C_f$  отличия существенные по RNGkEpsilon и kEpsilonLopesdaCosta моделям турбулентности – оба эти модели дают завышенные значения коэффициента подъёма на 51.49% и 38.15% соответственно. Поэтому при моделировании обтекания естественного препятствия – горы Сулайман в г. Ош рекомендуется не использовать RNGkEpsilon и kEpsilonLopesdaCosta модели турбулентности.

**Задача №2. Обтекание периодического холма.** Целью этой задачи является изучения влияния последовательно расположенных одинаковых двумерных холмов на распространения пассивной примеси. Геометрические размеры расчетной области приведены на рисунке 3.10, а расчетная сетка вблизи холмов приведена на рисунках 3.11-3.12, где отчетливо видно сгущение расчетной сетки около неровной поверхности для правильного учета соответствующего пограничного слоя.

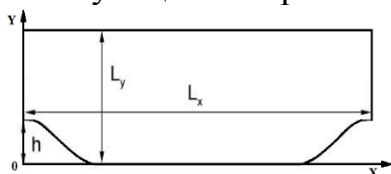


Рисунок 3.10 -

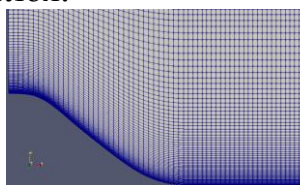


Рисунок 3.11-

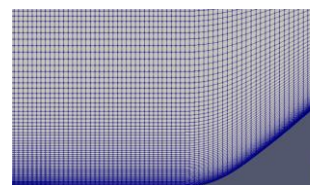


Рисунок 3.12-

Геометрия задачи и Расчетная сетка вблизи первого холма      Расчетная сетка вблизи второго холма  
система координат

Ниже приведено поле (рисунок 3.13) и изолинии (рисунок 3.14) модуля скорости, где отчетливо видна зона рециркуляции между холмами.

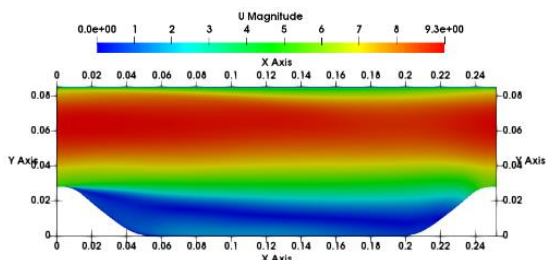


Рисунок 3.13- Поле модуля скорости

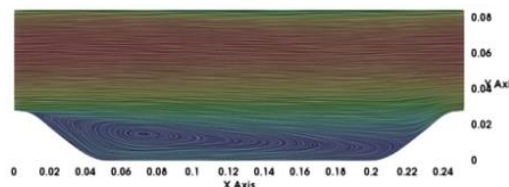


Рисунок 3.14 - Изолинии модуля скорости

Здесь видно, что между холмами образуется рециркуляционная зона, центр которого находится примерно около точки с координатами (0.075, 0.012).

Распределение концентрации экологически вредной пассивной примеси в разные моменты времени показаны на рисунке 3.15.

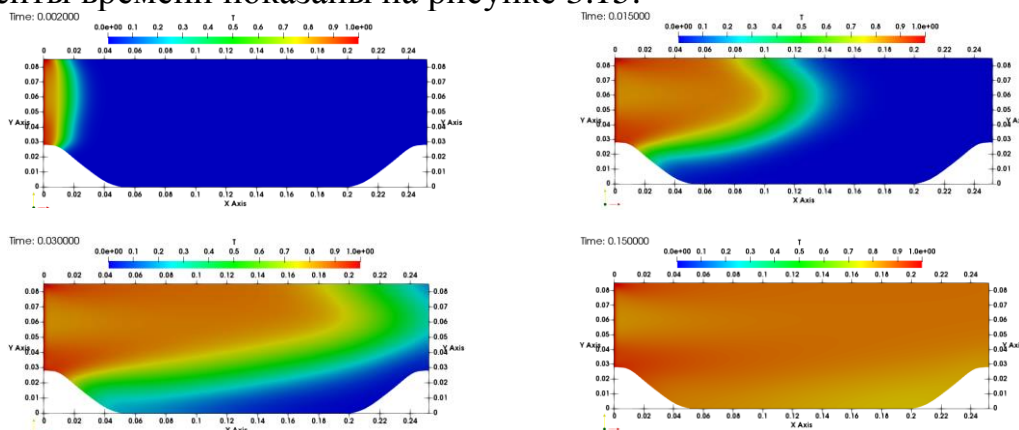


Рисунок 3.15 - Распределение примеси в разные моменты времени

Поперечный профиль пассивной примеси в сечениях  $x=0.05\text{м}$  (за первым холмом) и  $x=0.2\text{м}$  (перед вторым холмом) приведены на рисунках 3.16 и 3.17 соответственно.

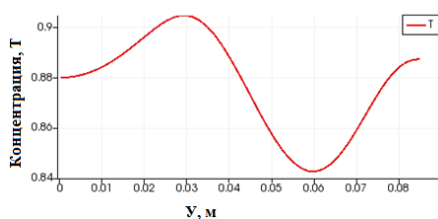


Рисунок 3.16 - Профиль пассивной примеси при  $x=0.05\text{м}$

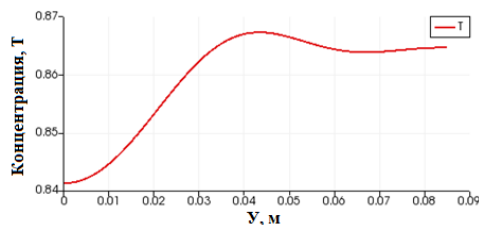


Рисунок 3.17 - Профиль пассивной примеси при  $x=0.2\text{м}$

Как видно отсюда, максимальная концентрация вредных примесей меньше на 4.5% в наветренной стороне второго холма по сравнению с подветренной

стороной первого холма. Поэтому опоры ЛЭП следует располагать именно в таких местах, где концентрации пассивной примеси имеет наименьшее значение.

**Задача № 3. Обтекание одиночного осесимметричного холма.** Цель этой задачи заключается в проверке алгоритма и метода построения трёхмерной расчетной сетки при помощи утилиты snappyHexMesh OpenFOAM. Схема задачи взята из работе Yuun G., Simpson R. L., (2005) и приведена на рисунке 3.18, начало систем координат расположено в геометрическом центре круговой основы холма.

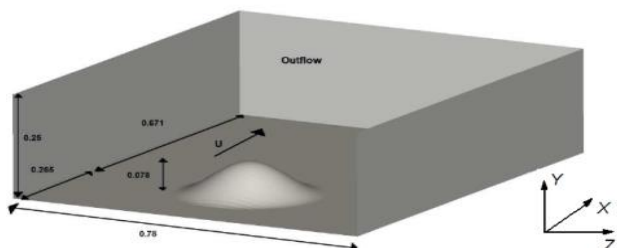


Рисунок 3.18 - Геометрия задачи и система координат

Предложенный в данной работе алгоритм и метод для построения трехмерной расчетной сетки заключается в нижеследующем. Написанной нами на языке Python программе по вышеприведённой формуле строится первоначальная форма поверхности холма в текстовом формате ASCII с последующим сохранением в формате GTIFF как рисунок. Затем при помощи, написанной нами программы на языке python этот рисунок будет преобразован в другой файл в стереолитографическом формате с расширением stl. Потом последний файл разместим в находящейся в папке constant папку triSurface пакета OpenFOAM. Затем подготовим C++ программу snappyHexMeshDict и размещаем её в папку system.

Последующем созданная утилитой blockMesh гексаэдральная фоновая сетка при помощи утилиты snappyHexMesh OpenFOAM на основе программы snappyHexMeshDict преобразуется в трёхмерную расчетную сетку. Детали измельчения расчетной сетки вблизи холма и нижней стенки приведены на рисунке 3.19аб.

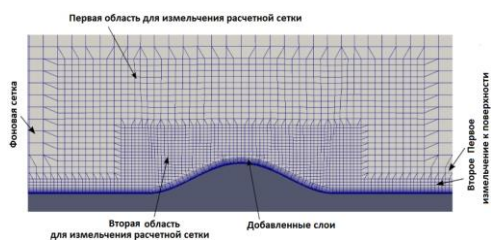


Рисунок 3.19а - Измельчение расчетной сетки

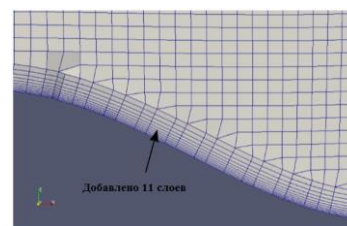


Рисунок 3.19б – Расчетная сетка около холма

Для измельчения расчетной сетки вблизи холма использованы две области и добавлены новые 11 слоев ближе к поверхности холма. Таким образом, общее число ячеек 1 636 480, имеются 2 уровня измельчения к поверхности, 2 области измельчения, 11 добавленных слоев около поверхности с коэффициентом расширения 1.2.

Расчеты показывают, что скорость набегающего потока по мере приближения к вершине холма возрастает и достигает максимального значения – 39 м/с, что больше максимальной входной скорости  $u_{max} = 27.5$  м/с примерно на 42% (рисунок 3.22г).

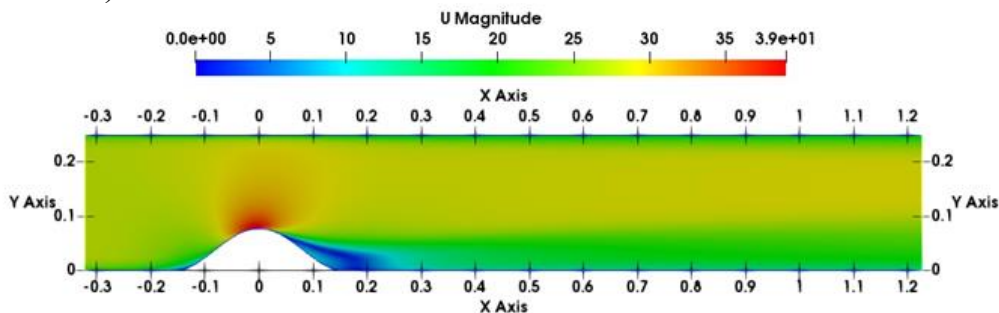


Рисунок 3.22г - Поле модуля скорости в плоскости симметрии,  $z=0$

Говоря иначе, происходит ускорение ветра по мере приближения к вершине холма. Поэтому линии ЛЭП не следует располагать на вершине холма во избежание больших ветровых нагрузок.

В целом, за холмом образуется течение со сложной трёхмерной рециркуляционной областью. Сказанное хорошо видно на рисунке 3.23, где приведено распределение изолиний модуля скорости в плоскости  $yOz$ , проходящей через точку  $x=0.12$ м.

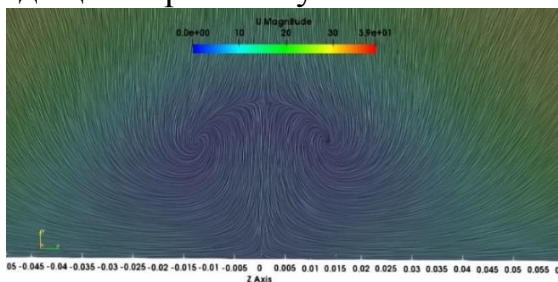


Рисунок 3.23 –Изолинии модуля скорости в сечении при  $x=0.12$ м

Здесь видно образование двух симметричных вихрей относительно плоскости  $z=0$ , вращающихся в двух противоположных направлениях, что отчётливо видно из следующего рисунка 3.24аб, где представлены изолинии продольной скорости  $U_x$  и угловой скорости  $\Omega$ .

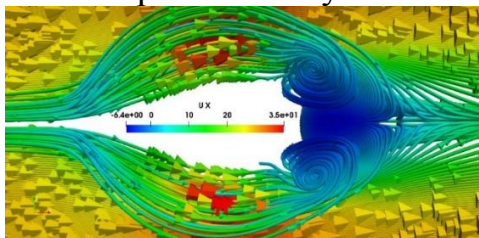


Рисунок 3.24а-Изолинии продольной скорости  $U_x$  (вид сверху)

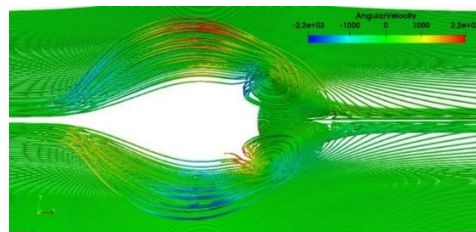


Рисунок 3.24б-Изолинии угловой скорости  $\Omega$  (вид сверху)

Сравнение численных результатов с соответствующими данными экспериментальной работы в сечении  $x/H=3.69$  представлено на рисунке 3.25. Маркеры обозначают экспериментальные измерения, а линия представляет

численные результаты. Характер изменения численных данных в целом совпадает с характером изменения соответствующих экспериментальных данных.

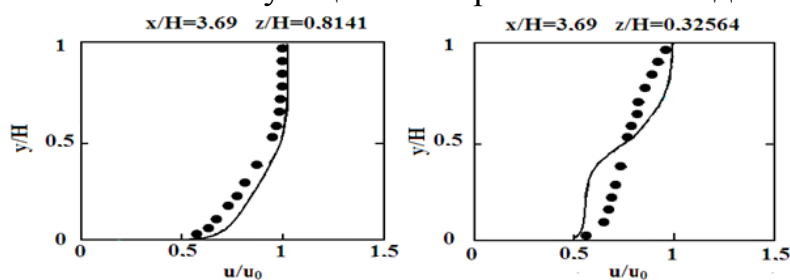


Рисунок 3.25 - Профили продольной скорости

Полченные численные данные показывают, что среди рассмотренных 5 моделей турбулентности, только  $RNG\ k - \epsilon$  модель показала наилучший результат по точкам отрыва — 6.25% и присоединения — 4.76%, а по двум ( $k - \epsilon$  модель Модель Спаларта-Аллмараса) моделям вовсе отсутствуют отрыв и присоединение потока в плоскости симметрии  $z=0$ .

**Задача №4. Часть 1. Создание трёхмерной расчетной сетки.** Первая часть задачи заключается в создании трёхмерной расчетной сетки с учетом сложной топографии местности. В качестве примера рассматривается Сулайман гора, в г. Ош, Кыргызстан (рисунок 3.1а).



Рисунок 3.1а - Сулайман гора, г. Ош, Кыргызстан.

**Алгоритм и метод создания трёхмерной неструктурированной сетки.** Весь алгоритм решения поставленной задачи состоит из следующих шагов. 1. В среде программы GRASS GIS выбираем карту горы Сулайман, г. Ош (рисунок 3.1б).

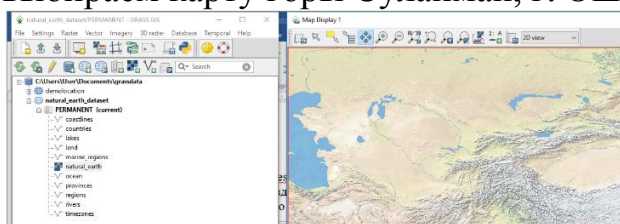


Рисунок 3.1б - Среда программы GRASS GIS 8.0.

2. Затем в среде этой программы местность вблизи горы Сулайман сохраняется в формате DEM - *digital elevation model*. 3. Потом, с помощью, написанной на языке Python нашей программы топографические данные формата DEM преобразуются в STL —стереолитографический формат. Топографические данные в формате STL записываются в виде ASCII текстового формата и сохраняется в папке *constant/triSurface* программы OpenFOAM 7.0. 4. Затем, при помощи нашей программы *snappyHexMeshDict* утилита *snappyHexMesh* создает трёхмерную расчетную сетку горы Сулайман.

Далее, используя построенную таким образом расчетную сетку методами вычислительной гидродинамики можно изучать влияние Сулейман горы на процесс распространения экологически вредных примесей.

**Часть два. Расчет обтекания горы Сулайман.** Так как соответствующих экспериментальных и численных данных по обтеканию горы Сулайман в научной литературе отсутствует, достоверность полученных результатов проверяется опосредственно следующим образом.

Во-первых, проведено изучение расчетной сетки на эффект насыщения. При расчетах использованы 4 разных расчетных сеток. Данные о расчетных сетках, использованных при обтекании горы Сулайман приведены в табл. 3.14.

Таблица 3.14 – Данные о использованных расчетных сетках

| Сетка | Гэксаэдр  | Призма | Клинообразные тетраэдры | Полиэдр | Число ячеек |
|-------|-----------|--------|-------------------------|---------|-------------|
| Mesh1 | 154 111   | 1 475  | 22                      | 21 164  | 176 772     |
| Mesh2 | 415 421   | 3 312  | 59                      | 47 610  | 466 402     |
| Mesh3 | 906 465   | 5 936  | 73                      | 84 895  | 997 369     |
| Mesh4 | 2 664 824 | 7 587  | 62                      | 271 102 | 2 943 575   |

Во-вторых, как показывают проведенные систематические расчеты, полученные численные результаты иногда существенным образом зависят от использованного метода дискретизации конвективного члена уравнения переноса (см. уравнение 2). Поэтому, во избежание данного отрицательного фактора были использованы 17 разных схем дискретизации и проверена эффективность той или иной схемы. Данные о числах итераций и времени вычислений приведены в табл. 3.16.

Таблица 3.16 – Число итераций и время вычислений

| Схемы дискретизации | Расчетная сетка | Mesh1    |       | Mesh2    |       | Mesh3    |       |
|---------------------|-----------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
|                     |                 | Итерации | Время | Итерации | Время | Итерации | Время |
| Centred schemes     | linear          | 231      | 224.9 | 243      | 430.6 | 304      | 1786  |
|                     | midPoint        | 219      | 209.7 | 239      | 385.6 | 303      | 1836  |
| limitedVanLeer      |                 | 181      | 132.3 | 219      | 493.4 | 285      | 1570  |
| NVD schemes         | Gamma0          | 221      | 217.8 | 231      | 548.3 | 296      | 1818  |
|                     | Gamma0.5        | 184      | 183   | 221      | 514   | 285      | 1751  |
|                     | Gamma1          | 175      | 163.7 | 210      | 539.6 | 273      | 1023  |
|                     | SFCD            | 174      | 96.14 | 205      | 470.3 | 264      | 1003  |
| TVD shemes          | limitedCubic    | 192      | 131.1 | 219      | 584.6 | 283      | 1459  |
|                     | limitedLine1    | 179      | 178.9 | 217      | 361.5 | 280      | 1532  |

Продолжение таблицы 3.16

|                     |               |                          |                  |                          |                  |                          |                 |
|---------------------|---------------|--------------------------|------------------|--------------------------|------------------|--------------------------|-----------------|
|                     | Minmod        | 171                      | 118.1            | 204                      | 338.6            | 262                      | 1008            |
|                     | MUSCL01       | 195                      | 117.5            | 229                      | 378.7            | 297                      | 1112            |
|                     | SuperBee      | 2000<br>Расходимо<br>сть | 1137             | 2000<br>Расходимо<br>сть | 3317             | 2000<br>Расходим<br>ость | 7608            |
|                     |               | 255<br>при 0.5           | 137.8<br>при 0.5 | 350<br>при 0.5           | 560.3<br>при 0.5 | 458<br>при 0.5           | 1657<br>при 0.5 |
|                     | vanLeer       | 181                      | 100.4            | 219                      | 355.9            | 285                      | 1051            |
| Upwinded<br>schemes | QUICK         | 182                      | 184.6            | 218                      | 364.1            | 284                      | 1140            |
|                     | filteredLine2 | 200                      | 174.2            | 230                      | 378.5            | 296                      | 1811            |
|                     | linearUpwind  | 119                      | 119.9            | 158                      | 309.5            | 199                      | 773.3           |
|                     | Upwind        | 119                      | 118              | 158                      | 264.3            | 199                      | 726.8           |

Следует отметить, что все расчеты с использованием приведенных в табл. 3.16 схем дискретизации проведены при одинаковых условиях (граничные условия, методы дискретизации и решения СЛАУ, коэффициенты нижней релаксации). При этом схема SuperBee не приводит к монотонной сходимости итерационного процесса SIMPLE при коэффициенте релаксации 0.7 при решении уравнения (2) переноса пассивной примеси. Если изменить коэффициент нижней релаксации от значения 0.7 на значение 0.5, то сходимость итерационного процесса улучшается.

Среди TVD схем vanLeer и limitedVanLeer схемы на всех трех сетках Mesh1, Mesh2 и Mesh3 приводят к совершенно одинаковому числу итераций – 181, 219 и 285. Однако время вычислений по схеме limitedVanLeer на 31.77%, 38.64% и 49.38% больше времени вычислений по схеме vanLeer на сетках Mesh1, Mesh2 и Mesh3 соответственно, т. е. эффективность вычислений по схеме limitedVanLeer на 31.77%, 38.64% и 49.38% меньше эффективности вычислений по схеме vanLeer на сетках Mesh1, Mesh2 и Mesh3.

Похожая картина наблюдается при использовании схем upwind и linear Upwind – число итераций на трех сетках Mesh1, Mesh2 и Mesh3 число итерация равно 119, 158 и 199 для обеих схем. Однако, время вычислений на сетках Mesh1, Mesh2 и Mesh3 для схемы linearUpwind больше времени вычислений по схеме upwind на 1.61%, 17.1% и 6.4% соответственно. Среди рассмотренных четырех NVD схем, по времени, затраченному на одну итерацию самой эффективной, оказалась схема SFCD - это время было равно 0.553с, 2.294с и 3.799с на трёх расчетных сетках Mesh1, Mesh2 и Mesh3 соответственно.

Далее представлены результаты моделирования поля концентрации пассивного скаляра на рисунке 3.31 в плоскости  $z=-200$ м. Направление ветра - слева направо.

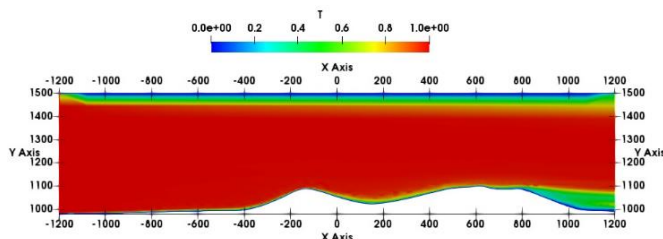


Рисунок 3.31 - Поле концентрации пассивного скаляра

Концентрации пассивной примеси выбраны в трёх точках P1(-265 1058.57 - 50), P2(550 1025.63 0) и P3(120 1005.68 -280).

Далее в табл. 3.17 приведены результаты исследования влияния схемы дискретизации конвективного члена в уравнении переноса пассивной примеси на концентрацию пассивной примеси в реперных точках P1, P2 и P3.

Таблица 3.17 – Концентрации пассивной примеси в реперных точках

| Точки                       | P1     | P2       | P3      |
|-----------------------------|--------|----------|---------|
| <b>Центрированные схемы</b> |        |          |         |
| linear                      | 0.5322 | 0.01684  | 0.06456 |
| midPoint                    | 0.4491 | 0.02818  | 0.06286 |
| <b>Схемы против потока</b>  |        |          |         |
| QUICK                       | 0.4516 | 0.005418 | 0.05886 |
| filteredLinare2             | 0.5165 | 0.01193  | 0.06092 |
| linearUpwind                | 0.3626 | 0.313    | 0.06895 |
| Upwind                      | 0.6137 | 0.4438   | 0.1823  |
| <b>TVD схемы</b>            |        |          |         |
| limitedCubic                | 0.4931 | 0.05008  | 0.0713  |
| limitedLinear1              | 0.5375 | 0.06958  | 0.08088 |
| Minmod                      | 0.5591 | 0.09488  | 0.09302 |
| MUSCL01                     | 0.4364 | 0.05804  | 0.06153 |
| SuperBee                    | 0.403  | 0.006198 | 0.04272 |
| vanLeer                     | 0.4913 | 0.04048  | 0.07086 |
| limitedVanLeer              | 0.4913 | 0.04048  | 0.07086 |
| <b>NVD схемы</b>            |        |          |         |
| Gamma0                      | 0.5011 | 0.0352   | 0.07188 |
| Gamma0.5                    | 0.5317 | 0.02615  | 0.07218 |
| Gamma1                      | 0.5571 | 0.03365  | 0.08224 |
| SFCD                        | 0.5654 | 0.04027  | 0.08548 |



Результаты исследования эффекта дискретизации конвективного члена в уравнении переноса пассивной примеси показывают, что не существует четкой численной схемы, которая в целом дает наилучшие результаты. Обнаружено, что *vanLeer* и *limitedVanLeer* дает совершенно одинаковые значения концентрации пассивной примеси в трёх реперных точках. Расчеты показывают, что из трех реперных точек концентрация пассивной примеси в точках P2 и P3 примерно на порядок меньше значений концентрации в точке P1. Поэтому, можно утверждать, что степень экологической комфортности в точках P2 и P3 на порядок выше, чем в точке P1.

**В ВЫВОДАХ** приведены основные результаты и выводы диссертации.

**В ПРИЛОЖЕНИЯХ** приведены 2 акта внедрения, текст разработанной программы *snappyHexMeshDict* для создания трёхмерной расчетной сетки для г.Ош Сулайман горы, комплекс из 7 программ решателя *passiveScalarPimpleFoam* для расчета переноса пассивной примеси, авторское свидетельство КыргызПатента № 743 от 30.04.2022 на набор программ подготовки начальных данных для математического моделирования турбулентным течения воздуха вокруг горы Сулайман г. Ош, Кыргызстан, 4 сертификата об участии в различных конференциях.

## ВЫВОДЫ

Основные результаты и выводы диссертационной работы состоят в следующих моментах:

1. Изучены наилучшие стандартные алгоритмы и методы для двухпараметрических моделей турбулентности в OpenFOAM для задач прогнозирования средних характеристик течения и концентрации пассивной примеси при обтекание неровных поверхностей. Дана практическая рекомендация не использовать *RNGkEpsilon* и *kEpsilonLopesdaCosta* модели турбулентности в задаче моделировании обтекания естественного препятствия – горы Сулайман.

2. Обнаружено, что при численном моделировании обтекания трёхмерного осесимметричного холма с использованием 5 моделей турбулентности, расчеты показывают, что скорость набегающего потока по мере приближения к вершине достигает значения – 39 м/с, что больше максимальной входной скорости  $u_{max} = 27.5$  м/с примерно на 42%. Другими словами, происходит ускорение ветра на вершине холма, поэтому рекомендуется линии ЛЭП не следует располагать в этих точках во избежание больших ветровых нагрузок.

3. Предложен алгоритм и метод автоматического построения трёхмерной неструктурированной расчетной сетки для задач обтекания естественного препятствия горы Сулайман, г. Ош.

4. Предложен и обоснован комплекс программных средств (passiveScalarPimpleFoam, GRASS GIS8, Python, Gnuplot), ориентированный на численную реализацию задачи влияния естественного препятствия на распространение экологически вредных примесей. Установлено, что концентрация пассивной примеси меньше на 4.5% в наветренной стороне второго холма по сравнению с подветренной стороной первого холма в случае численного моделирования нестационарного обтекания периодического холма воздушным потоком.

5. Впервые проведен численный расчет процесса стационарного обтекания естественного препятствия горы Сулайман, г. Ош с учетом распространения пассивной примеси. Обнаружено, что среди использованных 17 схем, схемы vanLeer и limitedVanLeer дают совершенно одинаковые значения концентрации пассивной примеси в трёх реперных точках. Показано, что среди рассмотренных четырёх NVD схем, по времени, затраченному на одну итерацию самой эффективной, оказалась схема SFCD - это время было равно 0.553с, 2.294с и 3.799с на трёх расчетных сетках Mesh1, Mesh2 и Mesh3 соответственно. Расчеты показывают, что из трех реперных точек концентрация пассивной примеси в точках P2 и P3 примерно на порядок меньше значений концентрации в точке P1. Поэтому, можно утверждать, что степень экологической комфортности на порядок выше, чем в точке P1.

## ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

В ходе выполнения настоящей исследовательской работы было рассмотрено достаточное число тестовых задач, отражающих в той или иной мере характерные особенности рассмотренного класса течения. Тестовые задачи для сравнений выбирались по возможности взаимосвязанные, с возрастающей сложностью.

Численные данные в двумерном приближении при помощи пакетов OpenFOAM, CFL3D и FUN3D по коэффициенту давления  $C_p$  практически совпадают, если не считать небольшие отличия в рециркуляционной зоне после холма. Однако по коэффициенту подъёма  $C_f$  отличия существенные по RNGkEpsilon и kEpsilonLopesdaCosta моделям турбулентности – оба эти модели дают завышенные значения коэффициента подъёма. Поэтому при моделировании обтекания естественного препятствия – горы Сулайман в г. Ош рекомендуется не использовать RNGkEpsilon и kEpsilonLopesdaCosta модели турбулентности.

Расчеты обтекания трёхмерного осесимметричного холма, показывают, что скорость набегающего потока по мере приближения к вершине холма достигает значения – 39 м/с, что больше максимальной входной скорости  $u_{max} = 27.5$  м/с примерно на 42%. Другими словами, происходит ускорение ветра на вершине холма, поэтому рекомендуется линии ЛЭП не следует располагать в этих точках во избежание больших ветровых нагрузок.

Результаты расчетов влияния горы Сулайман на распространения пассивной примеси показывают, что из трех реперных точек концентрация пассивной примеси в точках Р2 и Р3 примерно на порядок меньше значений концентрации в точке Р1. Поэтому, можно утверждать, что степень экологической комфортности в точках Р2 и Р3 на порядок выше, чем в точке Р1

Результаты диссертационной работы внедрены в деятельность Ошского регионального управления Министерства природных ресурсов, экологии и технического надзора Кыргызской Республики, имеется акт о внедрении результатов диссертационного исследования. Часть материалов диссертации включена в семестровый спецкурс кафедры информационных систем и программирования Ошского государственного университета.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Турганбаева А.Б.** Моделирование турбулентных течений в открытых разветвлённых каналах. [Текст] /Жайнаков А.Ж., Курбаналиев А.Ы., Турганбаева А. Б., Калеева А. К. // Вестник Кыргызского государственного технического университета им. И. Разакова, Бишкек, Кыргызстан, №34, 2015, с. 180-183. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26455467>

2. **Турганбаева А.Б.** Адаптация и проверка решателей OpenFOAM для моделирования течений, связанных с экологической безопасностью. [Текст] /Жайнаков А.Ж., Курбаналиев А.Ы., Турганбаева А.Б., Калеева А. К.// Известия Кыргызского государственного технического университета им. И. Разакова. 2016. т. 39. № 1 с.324-328. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27187847>

3. **Турганбаева А.Б.** Моделирование обтекания местности со сложным рельефом в пакете OpenFOAM. [Текст]/Курбаналиев А.Ы., Осмонбаев М.Ч., Турганбаева А.Б. // Известия Ошского технологического университета им. академика М.М. Адышева. 2018г. №1-1 с.122-127. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37351803>

4. **Турганбаева А.Б.** Моделирование обтекания трёхмерного холма в пакете OPENFOAM. [Текст]/Жайнаков А.Ж., Курбаналиев А.Ы., Осмонбаев М.Ч., Турганбаева А.Б.//Известия Кыргызского государственного технического университета им.И.Разакова. 2018г. №3 (47) с.468-477. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36329025>

5. **Турганбаева А.Б.** Численное моделирование обтекания цилиндра вязким потоком. [Текст]/Урманбетов Р.Дж., Дыйканова А.Т., Турганбаева А.Б. //Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана. Учредители: ОО «Общественная Академия ученых Кыргызской Республики». Бишкек. 2018г. №2 с.16-19. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35203500>

6. **Турганбаева А.Б.** Использование утилиты snappyHexMesh для генерации расчетной сетки. [Текст]/Жайнаков А.Ж., Курбаналиев А.Ы., Осмонбаев М.Ч., Турганбаева А.Б. // в сборнике: Проблемы оптимизации сложных систем. Материалы XIV Международный Азиатской школы-семинар.2018г. Издательство: Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК с.219-227. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=37014651>
7. **Турганбаева А.Б.** Алгоритм моделирования обтекания двумерных отрывных течений в пакете OpenFOAM. [Текст]/Жайнаков А.Ж., Калмурзаева А.Т., Турганбаева А.Б. // Известия Кыргызского государственного технического университета им.И.Разакова. 2019г. №2-1(50) с.340-344. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=39537360>
8. **Turganbaeva A. B.** Turbulent Flow Modelling using open source packages OpenFOAM and Paraview [Текст] /Kurbanaliev A.Y., Oichueva B. R., Kalmurzaeva A. T., Turganbaeva A. B. // 5<sup>th</sup> International Conference on Advances in Natural and Applied Sciences. September 21-23, Agri, Turkey. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://drive.google.com/file/d/1AoYVR21NPQSyfHvnCILs2\\_Mb3048UBu7/view](https://drive.google.com/file/d/1AoYVR21NPQSyfHvnCILs2_Mb3048UBu7/view)
9. **Турганбаева А.Б.** Численное моделирование турбулентного обтекания горы Сулайман [Текст]/Осмонбаев М.Ч., Турганбаева А.Б. // в сборнике: Проблемы оптимизации сложных систем. Материалы XIV Международный Азиатской школы-семинар.2019г. Издательство: Институт информационных и вычислительных технологий МОН РК 2019г.с.59-63. – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41540170>
10. **Turganbaeva A. B.** Simulation of turbulent flow over the top of a hill [Текст]/Kurbanaliev A.Y., Turganbaeva A.B., Berdibekova K.T., Vokoev K.A. // Scopus: IOP Publishing Conference Series Journal of Physics: Conference APITECH III 2021. 2094(2), 022045 – То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47965948>
11. **Турганбаева А.Б.** Численное моделирование распространения вредных выбросов над двумерной модели местности [Текст]/ Курбаналиев А. Ы., Турганбаева А.Б., Бердибекова Т.К., Матисаков Ж.К.// Вестник Кыргызского государственного университета строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова. – 2021. – № 4 (74). – с. 564-569.– То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48073207>
12. **Турганбаева А.Б.** Набор программ подготовки начальных данных для математического моделирования турбулентным течения воздуха вокруг горы Сулайман г. Ош, Кыргызстан. [Текст] / Турганбаева А.Б., Курбаналиев А.Ы.// Кыргыз патент. Авторское свидетельство. Программа для ЭВМ. 2022г., №743, 30.04.2022. То же: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://new.patent.kg/wp-content/uploads/2022/08/%D0%98%D0%9C-7-2022.pdf>

**Турганбаева Акпари Балтабаевнанын 05.13.18-математикалык моделдөө, сандык ыкмалар жана программалык комплекстер адистиги боюнча физика-математика илимдеринин кандидаты илимий даражасын изденип алуу үчүн «Татаал беттин үстүндөгү агымдарды математикалык моделдөөнүн алгоритмин түзүү» темасында диссертациясынын**  
**РЕЗЮМЕСИ**

**Ачкыч сөздөр:** тоскоолдуктун айланасындагы агым, экологиялык жактан зыяндуу пассивдүү аралашма, OpenFOAM, GRASS GIS8, Python, snappyHexMeshDict.

**Изилдөө объектиси** болуп үч өлчөмдүү турбуленттүү атмосфералык агымдар саналат.

**Изилдөөнүн предмети** – экологиялык зыяндуу аралашмалардын таралышына табигый тоскоолдуктун тийгизген таасирин сандык изилдөө.

**Изилдөөнүн максаты** болуп OpenFOAM пакетинин алкагында Ош шаарындагы Сулайман тоосунун айланасындагы агымдын мисалын колдонуу менен астыңкы беттин үстүндөгү структураланбаган торлордо татаал үч өлчөмдүү турбуленттүү агымдарды моделдөө үчүн эсептөө алгоритмдерин жана технологияларын иштеп чыгуу саналат.

**Изилдөө ыкмалары жана жабдуулар.** Математикалык моделдөө, эсептөө гидродинамикалык теңдемелерин сандык чыгаруу, OpenFOAM программалык пакетинин алкагында персоналдык компьютерлерди колдонуу менен эсептөө эксперименти.

**Алынган натыйжалар жана алардын жанылыгы.**

○ Айлана-чөйрөгө зыяндуу аралашмалардын жайылышына табигый тоскоолдуктун таасири маселесин сандык түрдө ишке ашырууга багытталган программалык каражаттардын комплекси (passiveScalarPimpleFoam, GRASS GIS8, Python, Gnuplot) сунушталган жана негизделген. Мезгилдүү дөңсөөнүн айланасындагы туруксуз аба агымын сандык моделдөө учурунда пассивдүү аралашма концентрациясы биринчи дөңсөөнүн жээк тарабына салыштырмалуу экинчи дөңсөөнүн шамалдаган тарабында 4.5% га төмөн экендиги аныкталган.

○ Биринчи жолу пассивдүү аралашмалардын таралышын эсепке алуу менен Ош шаарынын Сулайман тоосундагы табигый тоскоолдуктун айланасындагы стационардык агымдын процессинин сандык эсеби жүргүзүлдү. Эсептөөлөр көрсөткөндөй, үч таяныч пунктунун P2 жана P3 чекиттериндеги пассивдүү аралашманын концентрациясы болжол менен P1 чекитиндеги концентрациядан төмөнкү даражага барабар. Демек, экологиялык комфорттун даражасы P1 чекитине караганда P2 жана P3 чекиттеринде бир тартипке жогору деп айтууга болот.

**Колдонуу даражасы же колдонуу боюнча сунуштар.** Диссертациялык иштин натыйжалары шаар курууда далилдүү чараларды иштеп чыгуу үчүн пайдаланылышы мүмкүн.

**Колдонуу чөйрөсү:** Диссертациялык иштин натыйжалары айлана-чөйрөнүн метеорологиялык параметрлери боюнча фактылык маалыматтар болгон учурда

атмосферага булгоочу заттардын чыгарылышын көзөмөлдөөнүн аймактык автоматташтырылган системасын иштеп чыгууда колдонулушу мүмкүн.

## РЕЗЮМЕ

диссертации Турганбаева Акпари Балтабаевна на тему: «Создание алгоритма для математического моделирования течений над сложной подстилающей поверхностью» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18-математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

**Ключевые слова:** обтекание неровных поверхностей, экологически вредная пассивная примесь, OpenFOAM, GRASS GIS8, Python, snappyHexMeshDict.

**Объектом исследования** является трехмерный турбулентные атмосферные течения.

**Предметом исследования** является численное исследование влияния естественного препятствия на распространение экологически вредных примесей.

**Цель работы** заключается в разработке вычислительных алгоритмов и технологий для моделирования сложных трехмерных турбулентных течений на неструктурированных сетках над подстилающей поверхностью на примере обтекания горы Сулайман, г. Ош в рамках пакета OpenFOAM.

**Методы исследования и аппаратура.** Математическое моделирование, численное решение уравнений вычислительной гидродинамики, вычислительный эксперимент с применением персональных ЭВМ в рамках пакета программ OpenFOAM.

### **Полученные результаты и их новизна.**

- Предложен и обоснован комплекс программных средств (passiveScalarPimpleFoam, GRASS GIS8, Python, Gnuplot), ориентированный на численную реализацию задачи влияния естественного препятствия на распространение экологически вредных примесей. Установлено, что концентрация пассивной примеси меньше на 4.5% в наветренной стороне второго холма по сравнению с подветренной стороной первого холма в случае численного моделирования нестационарного обтекания периодического холма воздушным потоком.

- Впервые проведен численный расчет процесса стационарного обтекания естественного препятствия горы Сулайман, г. Ош с учетом распространения пассивной примеси. Расчеты показывают, что из трех реперных точек концентрация пассивной примеси в точках P2 и P3 примерно на порядок меньше значений концентрации в точке P1. Поэтому, можно утверждать, что степень экологической комфортности в точках P2 и P3 на порядок выше, чем в точке P1.

**Степень использования или рекомендации по использованию.** Результаты диссертационной работы могут быть использованы для разработки научно обоснованных мероприятий при градостроительстве.

**Область применения.** Результаты диссертационной работы при наличии фактической информации о метеорологических параметрах окружающей среды могут быть использованы в разработке территориальной автоматизированной системы контроля выбросов загрязнителей в атмосферу.

## SUMMARY

**of the dissertation of Turganbayeva Akpari Baltabayevna on the topic: "Creation of an algorithm for mathematical modeling of flows over a complex underlying surface" for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences, specialty 05.13.18-mathematical modeling, numerical methods and software packages.**

**Keywords:** flow around uneven surfaces, environmentally harmful passive scalar, OpenFOAM, GRASS GIS8, Python, snappyHexMeshDict.

**The object** of the study is a three-dimensional turbulent atmospheric flow.

**The subject** of the study is a numerical study of the effect of a natural obstacle on the spread of environmentally harmful impurities.

**The aim** of the work is to develop computational algorithms and technologies for modeling complex three-dimensional turbulent flows on unstructured grids above the underlying surface using the example of the flow around Mount Sulaiman, Osh in the frame of the OpenFOAM package.

**Research methods and equipment.** Mathematical modeling, numerical solution of computational fluid dynamics equations, computational experiment using personal computers within the OpenFOAM software package.

**The results obtained and their novelty.**

- A set of software tools (passiveScalarPimpleFoam, GRASS GIS8, Python, Gnuplot) is proposed and justified, focused on the numerical implementation of the problem of the influence of a natural obstacle on the spread of environmentally harmful impurities. It was found that the concentration of passive impurity is 4.5% less in the windward side of the second hill compared to the leeward side of the first hill in the case of numerical simulation of non-stationary flow around a periodic hill by air flow.

- For the first time, a numerical calculation of the process of stationary flow around the natural obstacle of Mount Sulaiman, Osh, taking into account the spread of passive admixture, was carried out. Calculations show that of the three reference points, the concentration of the passive impurity at points P2 and P3 is about an order of magnitude less than the concentration values at point P1. Therefore, it can be argued that the degree of environmental comfort at the points P2 and P3 is an order of magnitude higher than at point P1.

**Degree of use or recommendations for use.** The results of the dissertation work can be used to develop scientifically based measures in urban planning.

**Scope of application.** The results of the dissertation work, if there is actual information about the meteorological parameters of the environment, can be used in the development of a territorial automated system for controlling emissions of pollutants into the atmosphere.