

УДК 532.546

РАСЧЕТ ОБТЕКАНИЯ ГОРЫ СУЛАЙМАН В ПАКЕТЕ OPENFOAM

Турганбаева Акпари Балтабаевна, старший преподаватель,

mir_ayka@mail.ru

Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич, д.ф.-м.н, доцент,

kurbanaliev@rambler.ru

Ошский государственный университет, Ош, Кыргызстан

Аннотация. 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. Актуальной 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. Впервые проведено математическое моделирование обтекания естественного препятствия Сулайман гора, г. Ош, Кыргызстан в пакете открытого кода OpenFOAM7. Вычислены концентрации пассивной примеси в 3 реперных точках, расположенных в разных сторонах горы Сулайман.

Ключевые слова: моделирование ветрового потока, Навье-Стокс, холму, Сулайман гора, OpenFOAM.

OPENFOAM ПАКЕТИНДЕ СУЛАЙМАН ТООСУНУН АЙЛАНАСЫНДАГЫ АГЫМДЫ МОДЕЛДЕШТИРҮҮ

Турганбаева Акпари Балтабаевна, улук окутуучу, mir_ayka@mail.ru

Курбаналиев Абдикерим Ырысбаевич, ф.-м.и.д., доцент, kurbanaliev@rambler.ru

Ош мамлекеттик университети, Ош, Кыргызстан

Аннотация. Заманбап CFD инструменттерин колдонуу менен табигый татаал рельефте шамалдын агымын так жана ишенимдүү моделдөө булгоочу заттарды ташуу жана дисперсиялоо, ошондой эле шамалдын энергетикалык ресурстарын баалоо

үчүн абдан маанилүү. Автоунаалардан чыккан газдар жана шамалдын көтөрүлүшүн эске албаганда курулган жылытуу тутумдарынан чыккан эмиссиялар зыяндуу аралашмалардын аныктоочу булактары болуп саналган шаарларда калктын ыңгайлуу жашоо шарттарын камсыз кылуу актуалдуу маселе болуп саналат. Биринчи жолу OpenFAOM7 ачык булак пакетинде Сулайман тоосу, Ош, Кыргызстан табигый тоскоолдуктун айланасындагы агымдын математикалык моделдөө жүргүзүлдү. Пассивдүү аралашмалардын концентрациясы Сулайман тоосунун ар кайсы тарабында жайгашкан 3 эталондук пунктта эсептелген.

Ачык сөздөр: Шамалдын агымын моделдөө, Навье-Стокс, дөңсөө, Сулайман тоосу, OpenFOAM.

MODELING OF THE FLOW OVER THE SULAIMAN MOUNTAIN IN THE FRAME OF THE OPENFOAM PACKAGE

Turganbaeva Akpari Baltabaevna, senior lecturer

mir_ayka@mail.ru

Kurbanaliev Abdikerim Yrysbaevich,,

doctor of physical and mathematical sciences, dosent, kurbanaliev@rambler.ru

Osh State University, Osh, Kyrgyzstan

Abstract. *Accurate and reliable modeling of the wind flow over natural complex terrain using modern CFD tools is important for a wide range of applications, including the transport and dispersion of pollutants and the assessment of wind energy resources. An urgent problem is to ensure comfortable living conditions for the population in urban areas, where the determining sources of harmful impurities are automobile exhaust gases and emissions from heating systems built without taking into account the wind rose. For the first time, mathematical modeling of the flow around a natural obstacle, Sulaiman Mountain, Osh, Kyrgyzstan, was carried out in the OpenFAOM7 open source package. The concentrations of passive impurities were calculated at 3 reference points located on different sides of Sulaiman Mountain.*

Key words: *Wind flow modeling, Navier-Stokes, hillside, Sulaiman mountain, OpenFOAM.*

Введение. В последние годы наблюдается растущий интерес к применению вычислительной гидродинамики для моделирования сложных микрометеорологических процессов, таких как воздушный поток в городских районах, над сложной топографией или областью с существенными температурными градиентами [1, 4]. Среди нескольких факторов, которые способствовали такому интересу к данной тематике

можно подчеркнуть применение методов вычислительной гидродинамики в актуальных областях, таких как возобновляемые источники энергии, рассеивание загрязняющих веществ с учетом изучения и систем естественной вентиляции. В общем, данная проблема может быть описана в терминах взаимодействия в пределах атмосферной границы и внутри слоя, между воздушным потоком и объектом, которые определяют сложную геометрию поверхности обтекания.

Для того чтобы спроизвести адекватное моделирование процесса обтекания препятствия со сложной поверхностью, включающий в себя несколько физических процессов, взаимодействующих друг с другом и имеющих сложную геометрию, необходимо использовать вычислительные инструменты, способные включать эти процессы и сложные расчетные сетки [5, 6].

В этой работе, учитывая большую универсальность пакета, был выбран открытый код OpenFOAM [7]. Рассматриваемое естественное препятствие Сулайман гора расположена в центре г. Ош, Кыргызстан ($40^{\circ}31'46''$ с. ш. $72^{\circ}47'00''$ в. д.). Сулайман гора представляет собой пятиглавый известковый останец, вытянутый с запада на восток. Длина более 1140 метров, ширина — 560 метров.

Постановка задачи. Рассматривается задача исследования влияния различных схем дискретизации конвективного члена в уравнении переноса пассивной примеси на сходимость итерационного процесса на примере горы Сулайман, г. Ош (смотрите рисунок 1).

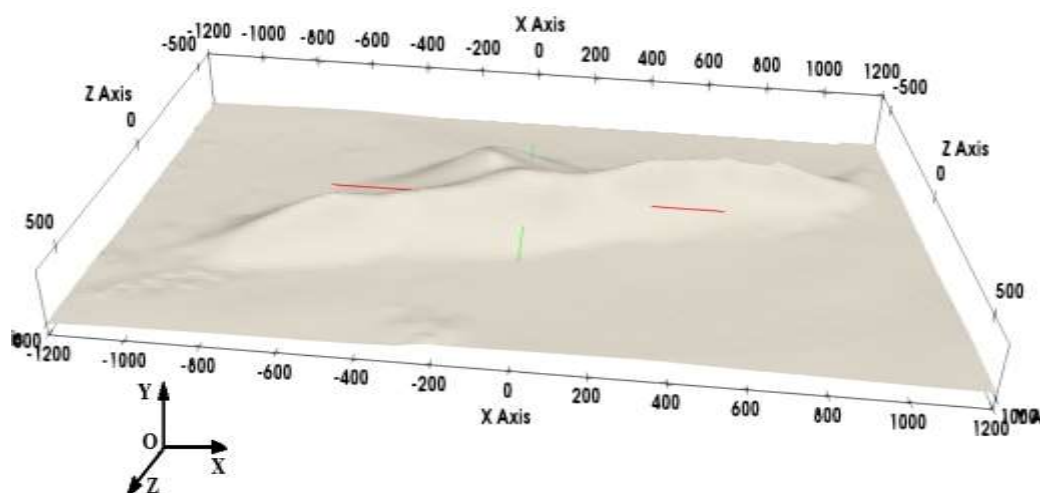


Рисунок 1 – Расчетная область и принятая система координат

Воздушный поток входит в расчетную область слева со скоростью 10 м/с. Вектор входной скорости направлен вдоль оси Ox .

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 [8]:

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

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_{eff} \frac{\partial c}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

где \bar{u}_i – компоненты средней скорости, ρ – плотность, c – 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 μ , $\overline{\rho u'_i u'_j}$ – напряжения Рейнольдса, требующие моделирования, α_{eff} – эффективный коэффициент диффузии, учитывающий эффекты как молекулярного, так и турбулентного переноса вещества. При наличии внешних сил эти уравнения необходимо дополнить соответствующими членами.

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

Сведения о граничных условиях, методах дискретизации и решения систем линейных алгебраических уравнений приведены в следующей табл. 1 и табл. 2.

Таблица 1 – Использованные граничные условия

Переменная	U	ω	k	ε
Граница				
inlet	type fixedValue; value uniform (10 0 0);	type fixedValue; value uniform 39.61;	type fixedValue; value uniform 0.375;	type fixedValue; value uniform 14.855;
outlet	type zeroGradient;	type zeroGradient	type zeroGradient	type zeroGradient
top	type	type	type	type

	noSlip;	omegaWallFunction; value uniform 39.61;	kqRWallFunction; value uniform 0.375;	epsilonWallFunction; value uniform 14.855;
side1	type noSlip;	type omegaWallFunction; value uniform 39.61;	type kqRWallFunction; value uniform 0.375;	type epsilonWallFunction; value uniform 14.855;
side2	type noSlip;	type omegaWallFunction; value uniform 39.61;	type kqRWallFunction; value uniform 0.375;	type epsilonWallFunction; value uniform 14.855;
Sulaiman	type noSlip;	type omegaWallFunction; value uniform 39.61;	type kqRWallFunction; value uniform 0.375;	type epsilonWallFunction; value uniform 14.855;

Для давления на выходе из расчетной области задано нулевое фиксированное значение (условие Дирихле), а на всех остальных границах – нулевой градиент (условие Неймана).

Таблица 2 – Используемые схемы дискретизации

Слагаемое	Схема	Порядок схемы
Градиент	Gauss linear	Второй
Конвекция Скорость k, ε, ω T	Gauss linear upwind grad(U) Gauss upwind Gauss upwind	Второй Первый Первый
Лапласиан	Gauss linear corrected	Второй

Таблица 3 – Решатели уравнений для основных переменных

Переменная	Решатель	Точность
Давления	метод сопряженных градиентов GAMG с использованием сглаживателя GaussSeidel	$1e^{-3}$

U, k, ε , ω , T	smoothSolver с использованием сглаживателя GaussSeidel	$1e^{-3}$
------------------------------------	---	-----------

Граничное условие для концентрации пассивной примеси T задается в виде линейного источника со значением $T=1$ (условие Дирихле) а на выходе задано условие Неймана– нулевой продольный градиент (zeroGradient). А на всех остальных границах расчетной области задано условие $T=0$.

Результаты расчетов и обсуждение. На следующих рисунках приведены поля компонент (рисунок 2а,б) и модулю скорости (рисунок 2г), давления (рисунок 3) и концентрации пассивной примеси (рисунок 4) в плоскости $z = -200$ м. Направление воздушного ветра – слева направо

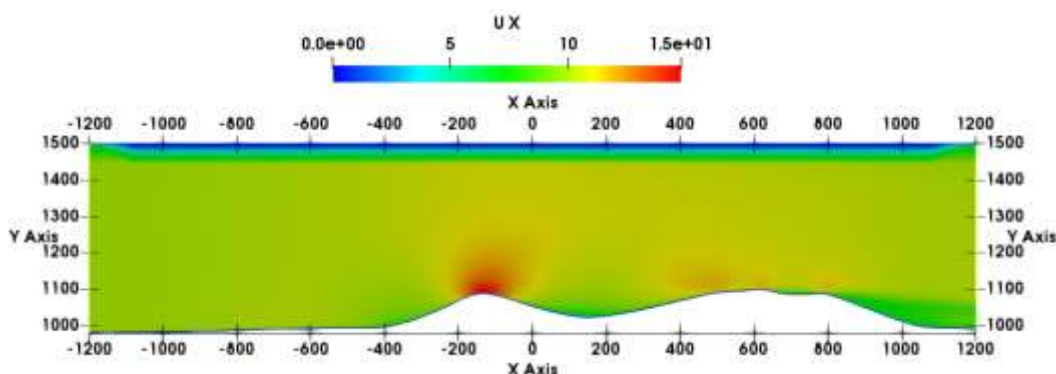


Рисунок 2а – Поле скорости Ux

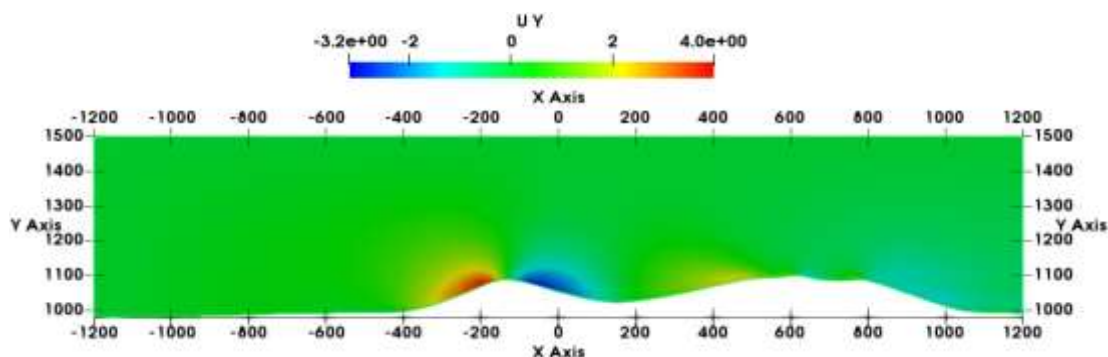


Рисунок 2б – Поле скорости Uy

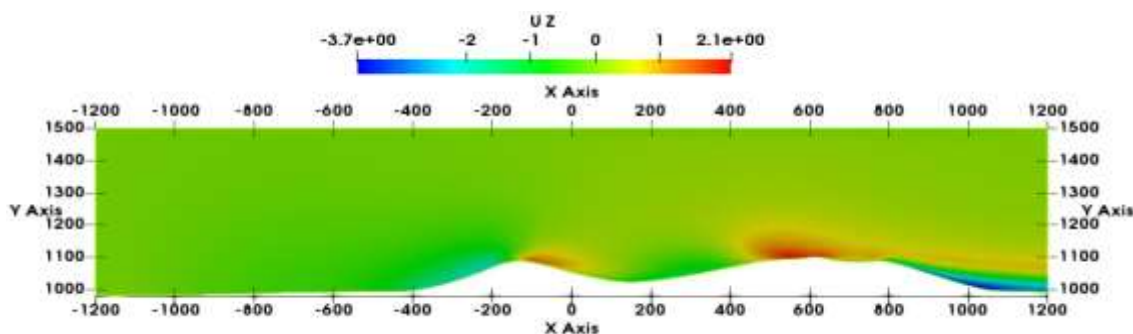


Рисунок 2в – Поле скорости Uz

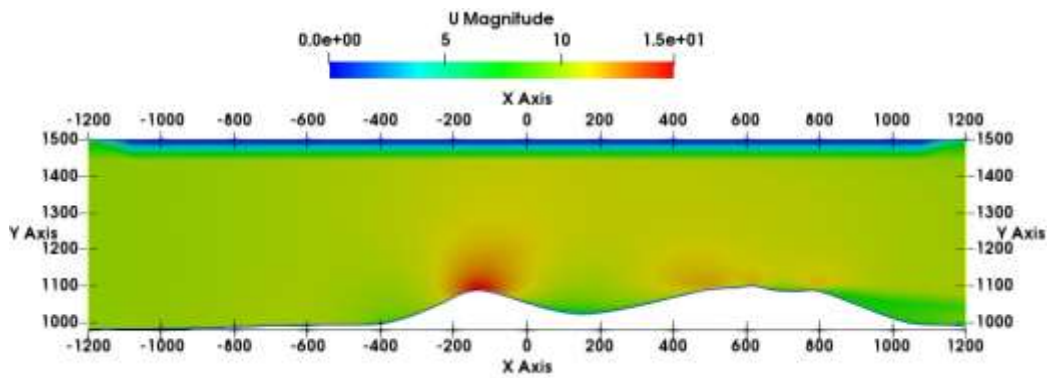


Рисунок 2г – Поле модуля скорости U

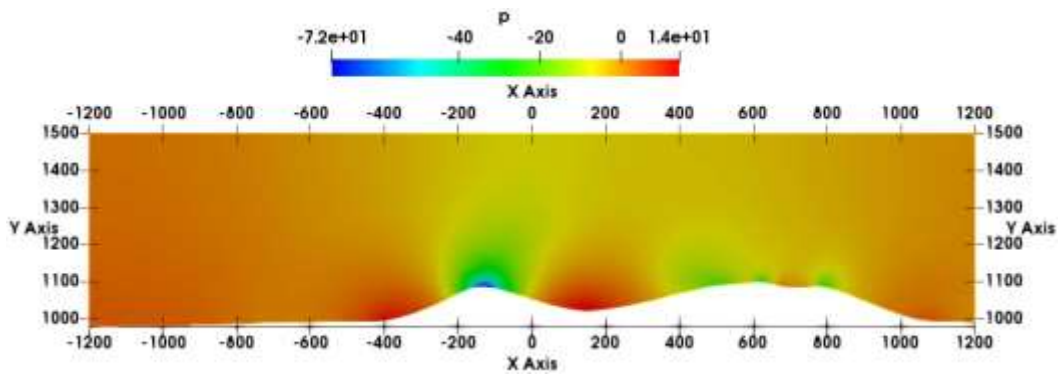


Рисунок 3 – Поле давления

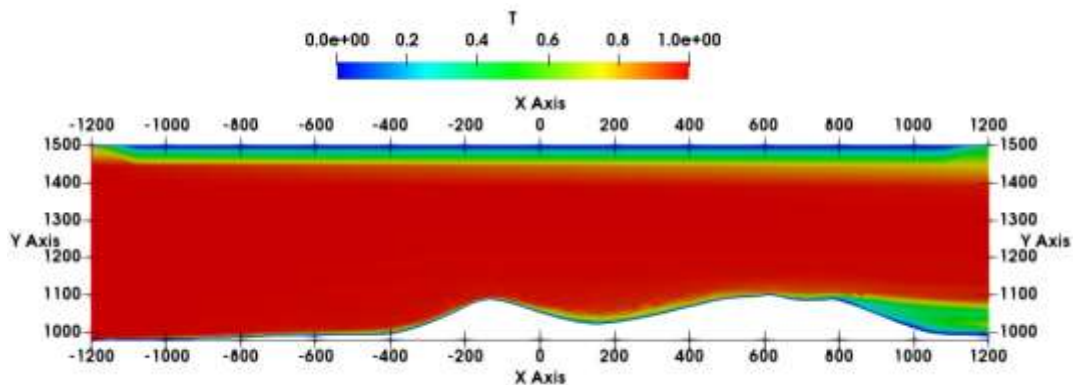


Рисунок 4 – Поле концентрации пассивной примеси

По мере приближения потока воздуха к первому холму имеет место повышения давления ($x \approx -400$ м, смотрите рисунок 3). Далее по мере приближения к первому холму поток ускоряется, модуль скорости достигает своего максимального значения 11.4 м/с что видно на рисунке 5.

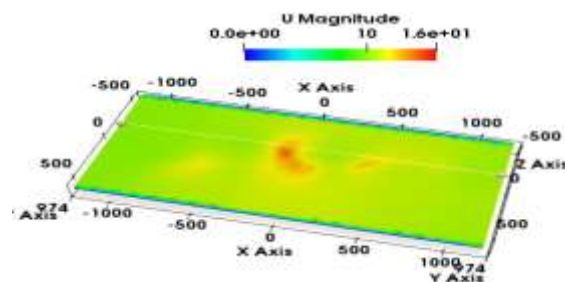


Рисунок 5 – Поле модуля скорости в плоскости $y=1131.4$ мм

Ускорение потока воздуха в плоскости на высоте $y=1131.4\text{мм}$ показано на следующем рисунке 6.

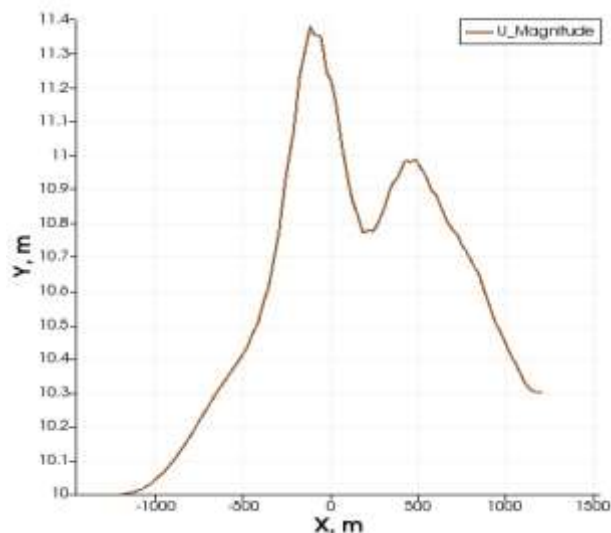


Рисунок 6 – Ускорение потока в плоскости $z=-200\text{м}$

Далее в табл. 4 приведены результаты исследования влияния схемы дискретизации конвективного члена в уравнении переноса пассивной примеси (2). Концентрации пассивной примеси выбраны в трёх точках P1(-265 1058.57 -50), P2(550 1025.63 0) и P3(120 1005.68 -280) (рисунок 7).

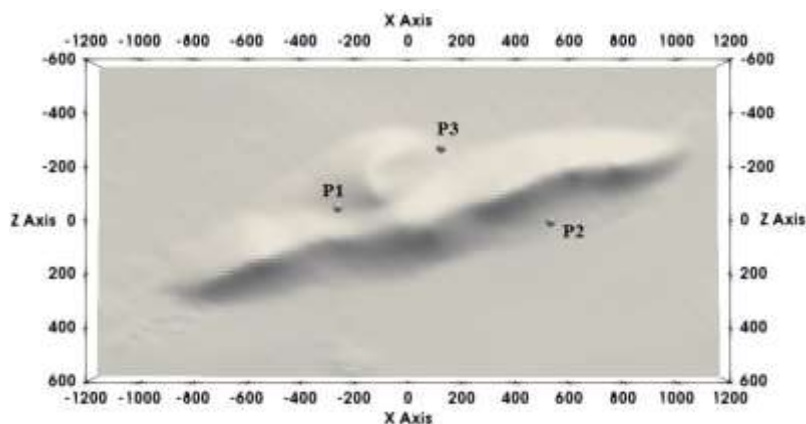


Рисунок 7 – Расположение реперных точек

Таблица 4 – Концентрации пассивной примеси в реперных точках

Точки	P1	P2	P3
Центрированные схемы			
linear	0.5322	0.01684	0.06456
midPoint	0.4491	0.02818	0.06286
Схемы против потока			

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
TVD схемы			
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
NVD схемы			
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.

Заключение. Впервые проведено математическое моделирование обтекания естественного препятствия Сулайман гора, г. Ош, Кыргызстан в пакете открытого кода OpenFAOM7. Вычислены концентрации пассивной

примеси в 3 реперных точках, расположенных в разных сторонах горы Сулайман. 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.

Литература

1. **Yoshihide Tominaga**, Akashi Mochida, Ryuichiro Yoshie, Hiroto Kataoka, Tsuyoshi Nozu, Masaru Yoshikawa, Taichi Shirasawa. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Volume 96, Issues 10–11, October–November 2008, Pages 1749-1761.
2. **Mary C. Bautista**1, Louis Dufresne, and Christian Masson. Hybrid turbulence models for atmospheric flow. A proper comparison with RANS model. *Web of Conferences* 5, 03001, 2015.
3. **Yi Han** et al. Large eddy simulation for atmospheric boundary layer flow over flat and complex terrains. *Journal of Physics: Conference Series*, 753 032044, 2016
4. **Курбацкий, А.Ф.** Различие в турбулентной диффузии между активным и пассивным скалярами в термически устойчивой стратифицированной среде, ТБТ, 2004, том 42, выпуск 1, 83–90.
5. **Paraggio F.**, G.Crasto. RANS Simulations of Askervein hill with OpenFOAM. Conference Paper. Third Symposium on OpenFOAM® in Wind Energy, Milan 15-17 June 2015.
https://www.academia.edu/25192173/RANS_Simulations_of_Askervein_hill_with_Open_FOAM.
6. **Carlos Peralta**, H. Nugusse, S. P. Kokilavani, Bernhard Stoevesandt. Validation of the simpleFoam (RANS) solver for the atmospheric boundary layer in complex terrain. *ITM Web of Conferences* · January 2014.
7. OpenFOAM v7 User Guide. <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v7/>
8. **Ferziger J. H.**, Peric M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Berlin: Springer Verlag, 2002. —423p.