

**КУРБАНАЛИЕВ А. Ы., ТУРГАНБАЕВА А. Б., МАТИСАКОВ Ж. К.,
БЕРДИБЕКОВА К.Т.**

¹Ошский государственный университет Ош, Кыргызская Республика

²Ошский государственный педагогический университет Ош, Кыргызская Республика

³Ошский технологический университет, Ош, Кыргызская Республика

**KURBANALIEV A.Y., TURGANBAYEVA A. B., MATISAKOV ZH. K.,
BERDIBEKOVA K.T.**

¹Osh State University Osh, Kyrgyz Republic

²Osh State Pedagogical University, Osh, Kyrgyz Republic

³Osh Technological University, Osh, Kyrgyz Republic
kurbanaliev@rambler.ru, mir_ayka@mail.ru, zhmatiskov@mail.ru

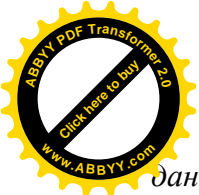
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ НАД ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ МЕСТНОСТИ

NUMERICAL SIMULATION OF THE PROPAGATION OF A HARFULL EMISSIONS PASSIVE IMPURITY OVER A TWO-DIMENSIONAL MODEL OF THE TERRAIN

Булгоочу заттардын жогору концентрациясы күчтүү бөлүп чыгаруудан менен гана эмес, анын дисперсиясынын азайуусунан, айрыкча атмосферанын жер бетине жакын жайгашкан катмарындагы булгоочу заттардын көп бөлүгү бөлүнүп чыгышы менен шартталган. Бул иште эки өлчөмдүү дөңсөлүү жердин айланасындагы шамалдын агымынын жана булгоочу заттардын таралышынын сандык ыкмалардын жардамында алдын ала айтуу каралган. Эки өлчөмдүү тегиз эмес жер бетинин үстүндө пассивдүү заттын таралышын математикалык моделдештирүүнүн жыйынтыктарын аныктыгын текшерүү үчүн эксперименттик иштин берилгендери колдонулду. Сандык маалыматтар экспериментте өлчөнгөн ылдамдыктын жана турбулунттуулуктун мүнөздөмөлөрүнүн профилдери менен канааттандырарлык түрдө дал келет. Аэродинамикалык тегиз эмес жер бетиндеги атмосферанын катмарындагы агымдын Рейнольдс санынан көз каранда эместиги жөнүндөгү гипотеза сандык ыкмалардын жардамында тастыкталды. Жер бетинде ар кандай орунда жана бийиктикте жайгашкан үзгүлтүксүз жана кыска убакыт ичинде аракет кылган булактардан тараган булгоочу заттардын таралышына эки өлчөмдүү дөңсөлөрдүн тийгизген таасири изилденди. Жер бетинин деңгээлиндеги булгоочу заттардын концентрациясы алардын булактарынын бийиктигинин жогорулашына жараша кыйла азаят. Мындан сырткары сандык ыкмалардын жардамында алынган жер бетинин деңгээлинде концентрация бир аз жогору болгон. Бул, жердин деңгээлиндеги булгоочу заттардын аз концентрациясына жана булгоочу заттардын таралуу багытынын өзгөрүшүнө алып келүүчү, талаа эксперименти учурунда жер бетине жакын жайгашкан шамалдын багытынын чоң өзгөрүшү менен байланышы мүмкүн.

Өзөк сөздөр: атмосферанын агымы, сандык моделдөө, сырткы катмар, дөбө, булганыч заттардын жыйындысы, OpenFAOM, simpleFoam.

Высокие концентрации загрязняющих веществ обусловлены не только сильными выбросами, но и уменьшением дисперсии, особенно в слое атмосферы, прилегающем к поверхности, где выбрасывается большая часть загрязняющих веществ. В этой работе рассмотрен прогноз ветрового потока и рассеивания загрязняющих веществ по двумерной холмистой местности численными методами. Данные экспериментальной работы использовались для проверки достоверности численных результатов моделирования распространения пассивной примеси над двумерной неровной местностью. Численные



данные достаточно удовлетворительно согласуются с измеренными в эксперименте профилями средней скорости и характеристик турбулентности. Гипотеза о независимости течения пограничного слоя атмосферы по аэродинамически неровной местности от числа Рейнольдса подтверждена численными методами. Также исследовано влияние двумерных холмов на рассеивание загрязняющих веществ от непрерывно или временно действующих источников различной высоты и местоположения выбросов. Концентрации вредных примесей на уровне поверхности земли значительно снижаются по мере увеличения высоты источника их выбросов. Кроме этого, численные значения концентрации на уровне земли несколько завышены. Это вероятно, связано с большими отклонениями направления ветра вблизи земли во время полевого эксперимента, которые приводят к изменению направления распространения и низким концентрациям вредных выбросов на уровне земли.

Ключевые слова: атмосферное течение, численное моделирование, пограничный слой, холм, концентрация загрязняющих веществ, OpenFAOM, simpleFoam.

High concentrations of pollutants are caused not only by strong emissions, but also by a decrease in dispersion, especially in the atmospheric layer adjacent to the surface, where most of the pollutants are emitted. In this paper, the forecast of wind flow and dispersion of pollutants over a two-dimensional hilly terrain is considered by numerical methods. The experimental data were used to verify the reliability of the numerical results of modeling the propagation of a passive impurity over a two-dimensional uneven terrain. The numerical data agree quite satisfactorily with the profiles of the average velocity and turbulence characteristics measured in the experiment. The hypothesis about the independence of the flow of the boundary layer of the atmosphere over an aerodynamically uneven terrain from the Reynolds number is confirmed by numerical methods. The influence of two-dimensional hills on the dispersion of pollutants from continuously or temporarily operating sources of different heights and locations of emissions is also studied. Concentrations of harmful impurities at the level of the earth's surface significantly decrease as the height of the source of their emissions increases. In addition, the numerical values of the concentration at ground level are somewhat overestimated. This is probably due to large deviations in the wind direction near the ground during the field experiment, which lead to a change in the direction of propagation and low concentrations of harmful emissions at ground level.

Key words. Atmospheric flow, numerical simulation, boundary layer, hill, concentration of pollutants, OpenFOAM, simpleFoam.

Введение. Атмосферный поток над холмом с умеренным уклоном представляет собой сложный случай потока на местности, который был объектом многих теоретических и экспериментальных исследований в течение последних лет. Во многих случаях источники загрязнения воздуха расположены в холмистой местности, которые сильно влияют на местное поле потока, а также вызывают значительные изменения характеристик рассеивания из-за разделения потока, застоя, наезда, восходящего и нисходящего потока и т.д. Было проведено множество исследований на двух- и трехмерных холмах различной формы, чтобы найти взаимосвязь между полем потока под топографическими воздействиями и характеристиками дисперсии.

Натурные полевые эксперименты имеют серьезные ограничения из-за больших затраты и трудностей в контроле условий проведения эксперимента. Большинство экспериментов проводились в лабораториях с использованием аэродинамической трубы [1-6]. Численные исследования были проведены в работах [7-9].

Численные методы имеют много преимуществ при моделировании процессов загрязнения атмосферного воздуха. Они позволяют получать результаты быстрее, дешевле и надежнее по сравнению с экспериментами. Процессы распространения радиоактивных загрязнителей в результате аварии на атомной электростанции должны быть рассмотрены для всех возможных ситуаций для быстрого и надлежащего измерения. Численное моделирование при этом рассматриваются как более подходящий инструмент для этой цели.

Целью данной работы является прогнозирование процесса распространения загрязняющих веществ в турбулентном потоке над двумерной холмистой местности посредством математического моделирования. Математическое моделирование проведено в рамках пакета OpenFOAM [10], а визуализация полученных численных результатов выполнена при помощи Paraview5.6 [11]. Пакет Open FOAM был разработан для решения задач в области механики сплошных сред [12-15].

В целях проверки адекватности математической модели и достоверности полученных численных расчетов было проведено сравнение с соответствующими экспериментальными данными полей потока в аэродинамической трубе.

Постановка задачи. В 1980 году Агентство по охране окружающей среды США (EPA) провело полномасштабный эксперимент в Айдахо, США [4] по распространению вредных примесей в атмосфере. Выбранным местом был Cinder Cone Butte, изолированный, примерно осесимметричный холм высотой около 100 м и радиусом 500 м. Метеорологическая информация указывает на возникновение в достаточной степени стабильных условий в ночное время в этом регионе. Трассирующий газ был выпущен примерно в 600 метрах с наветренной стороны холма, на высоте 35 м над земной поверхностью (см. рис.1). Датчики были помещены на уровне земли по всему холму, и для определения концентраций индикаторных веществ использовалась газовая хроматография. Результаты представляют собой усредненные по часам значения. Скорость и направление ветра, колебания температуры и скорости были измерены на шести метеорологических вышках (четыре из них высотой 10 м, одна высотой 30 м и одна высотой 150 м). Системы других зондов собрали некоторые данные выше высот башен.

Принятия в этой работе расчетная область для вычисления гидродинамического поля течения показана на рис. 1.

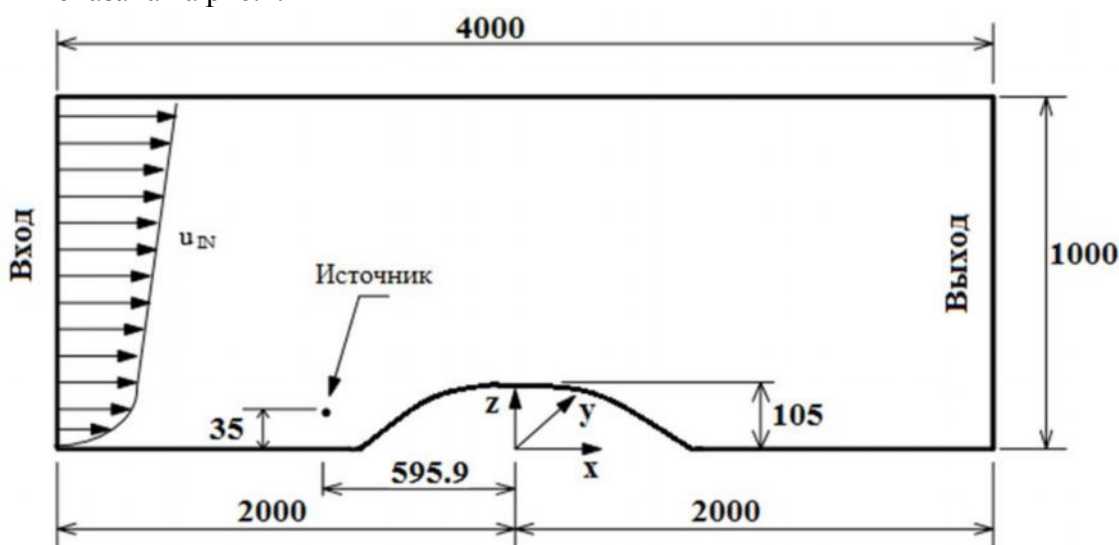


Рис. 1. Схема течения и система координат

В данной работе, задача вычисления поля распределения концентрации вредных пассивных примесей в атмосферном потоке от источника загрязняющего вещества разделена на два отдельных этапа. Сначала определяется значения скорости, температуры и турбулентные характеристики течения во всей расчетной области. После этого вычисленное таким образом поля скорости и турбулентных характеристик используются для решения уравнения для концентрации вредных веществ. Это разделение может быть выполнено, поскольку считается, что перенос загрязняющих веществ является пассивным и не влияет на общую гидродинамику течения. Фактически, в эксперименте [4], с которым мы сравниваем наши результаты, трассирующий газ был выпущен практически без импульса или силы плавучести. Управляющими уравнениями для стратифицированного потока являются сохранение массы, импульса и энергии, записанные ниже в обычной тензорной записи.



Дисперсия загрязняющего вещества вычисляется из уравнения концентрации после того, как поток разрешен.

Математическая модель. Основными уравнениями для стратифицированного несжимаемого атмосферного потока являются законы сохранения массы, импульса и энергии, записанные ниже в обычной тензорной форме [16,17]:

| | |
|-------------------------|-----|
| $\frac{au_i}{ax_i} = 0$ | (1) |
|-------------------------|-----|

| | |
|--|-----|
| $\frac{au_i}{at} + u_j \frac{au_i}{ax_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{a}{ax_i} (P + \dots) + \frac{a}{ax_j} K_{x_j} \frac{au_i}{ax_j} + \frac{au_j}{ax_i} - g_{i3}$ | (2) |
|--|-----|

| | |
|--|-----|
| $\frac{ac}{at} + u_j \frac{au_i}{ax_i} = \frac{a}{ax_i} K_{x_j}^h \frac{ac}{ax_i} + s$ | (3) |
|--|-----|

где u_i – скорость в направлении x_i , ρ – плотность воздуха, p – давления, c – концентрация, g – вектор гравитационного ускорения, K_{x_j} – турбулентная вихревая вязкость в направлении x_j , $K_{x_j}^h$ -диффузионная вихревая способность в направлении x_j для концентрации вещества. Поскольку горизонтальный линейный размер рассматриваемой задачи составляет 3 км, силой Кориолиса можно пренебречь.

Дисперсия загрязняющего вещества с концентрацией C вычисляется из уравнения переноса концентрации (3) после того, как определены поля гидродинамических и турбулентных величин.

В потоках окружающей среды заметен неизотропный характер турбулентности, особенно в случае переноса загрязняющего вещества – пассивного скаляра в потоке. Например, в случае стабильно стратифицированных потоков вертикальные колебания сильно замедляются из-за сил плавучести (возникающих из-за положительного вертикального градиента температуры), в то время как горизонтальные колебания - нет. Применяемая модель турбулентности является неизотропной k-ε -моделью. Анизотропия турбулентности учитывается путем рассмотрения различных турбулентных диффузий для горизонтального и вертикального направлений.

Численная модель. Расчетная область была расширена на 3 км в направлении координаты z . При вычислении концентрации расчетная сетка имеет длину 1500 м в направлении координаты x , начиная с 50м с наветренной стороны от источника. В направлении координаты z она простиралась на 1200м, а в направлении координаты y на 300м.

Дискретизация расчетной области и системы уравнений (1-3) осуществлена при помощи метода конечных объемов [16-18]. Интерполяционная схема QUICK была использована для дискретизации конвективного члена уравнений (1-3). Схема upwind – против потока использована для дискретизации конвективного члена в уравнениях для турбулентных характеристик.

Скорость на входе в расчетную область задана на основе экспериментальных данных. Поскольку интенсивность турбулентности не измерялась, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации на входе определялись путем решения одномерных аналогов (в вертикальном направлении) определяющих уравнений для потока с использованием профиля скорости.

Решение связанных через давление нелинейных уравнений (1-3) осуществлялось при помощи решателя simpleFoam пакета OpenFOAM [10], использующий известный алгоритм SIMPLE [16-18]. Более подробную информацию о методах дискретизации и решения можно найти в руководстве пользователя - OpenFOAM 7.0 User’s Guide [10].



Результаты расчетов и обсуждение. Интересной особенностью стабильных стратифицированных потоков является тот факт, что при наличии препятствия на низких уровнях у потока недостаточно энергии, чтобы преодолеть холм. Этот нижний слой имеет значительное боковое расхождение с потоком, следующим за пересечениями холма. Согласно [4], существует высота вверх по течению - высота разделительной линии, ниже которой поток имеет недостаточную энергию для достижения вершины холма и должен проходить по сторонам холма. Расчетная высота так называемой разделительной линии для данного исследования составляет 32 метра. Однако в численном моделировании нет четкого разделения между нижним (почти горизонтальным) и верхним (проходящим над холмом) слоями. Было обнаружено, что для высот до ≈ 10 м поток по существу горизонтален, проходя вокруг холма. Выше ≈ 20 м поток пересекает холм без бокового расхождения. Можно предположить, что численная высота разделительной линии составляет ≈ 15 м, что значительно меньше теоретической высоты 32 м.

Шлейф, выпущенный в стабильной атмосфере над равнинной местностью, требует больших расстояний для достижения земли из-за относительно небольшой турбулентной диффузии, в отличие от выбросов при нейтральных или нестабильных потоках. На неровной местности шлейф достигает земли гораздо ближе к источнику, по сравнению с равнинной местностью, из-за рельефа местности. В данном случае шлейф достигает земли на подветренном склоне холма, примерно в 400 метрах от источника. Другой важной особенностью является боковое отклонение, вызванное расхождением потока, который огибает холм на низких уровнях. Результаты распределения концентрации на высоте 1 м над местным рельефом показаны на рис. 2.

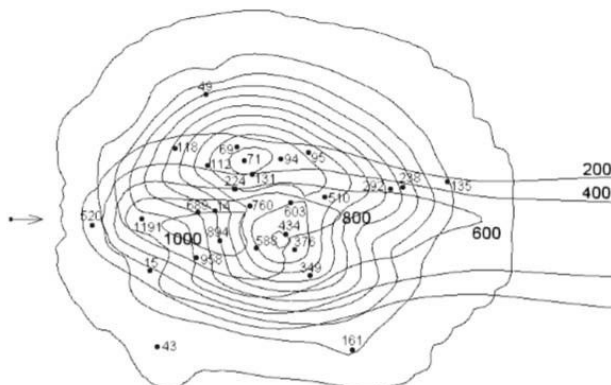


Рис. 2. Контуры концентрации на уровне земли

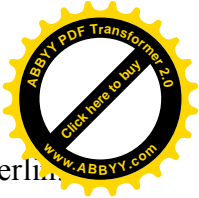
Численные результаты завышены по сравнению с экспериментальными значениями. Это можно объяснить большим изменением направления потока вблизи земли (от 20° до 240° , в среднем 122°). Изменения направления ветра попеременно перемещают шлейф с одной стороны холма на другую. Это приводит к большому распространению реального шлейфа и, следовательно, к более низким концентрациям на земле.

Выводы. Модифицированная неанізотропная модель $k-\epsilon$ применяется для моделирования трехмерного стабильно стратифицированного атмосферного и рассеивания по реальной местности. Анизотропия турбулентности учитывается путем рассмотрения различных турбулентных диффузий для горизонтального и вертикального направлений. Как только поток рассчитан, переменные интерполируются во вторую сетку и решается уравнение концентрации. Решение дифференциальных уравнений модели проведено на основе метода конечных объемов. Результаты показывают характеристику бокового расхождения низких уровней потока, которые очерчивают холм горизонтально. Это боковое расхождение приводит к тому, что шлейф отклоняется к одной стороне холма. Прогнозируемая траектория шлейфа согласуется с экспериментальными данными. Численные концентрации на земле завышены, возможно, во многом из-за больших изменений среднего направления ветра во время полевого эксперимента, что увеличило разброс реального шлейфа и привело к снижению концентраций.



Список литературы

1. Almedia G. P., Durao D.F.G., Heitor M.V. Wake flows behind two dimensional model hills. *Exp. Thermal and Fluid Science*, 1992, 7, p.87
2. Almedia G. P., Durao D.F.G., Simoes J.P., Heitor, M.V. (1990). Laser-Doppler measurements of fully developed turbulent channel flow. *Proc. 5th Symp. Appl Laser Techniques to Fluid Meet.*, 1990, pp. 5-12.
3. Classic Collection database. Case 18. 2D Model Hill Flows. Available at: <http://cfm.mace.manchester.ac.uk/ercoftac/doku.php?id=cases:case018>. Access data 05.05.2021.
4. Truppi, L. E., Holzworth, G. C., 1984, EPA Complex Terrain Model Development Description of a Computer Data Base From Small Hill Impaction Study no. 1 - Cinder Cone Butte, Meteorology and Assessment Division, Environmental Sciences Research Lab., EPA, North Carolina, USA.
5. Arya, S. P. S., Shipman, M. S. and Courtney, L. Y., 1981, An Experimental Investigation of Flow and Diffusion in the Disturbed Boundary Layer Over a Ridge: 11. Diffusion from a Continuous Point Source, *Atmos. Environ.*, Vol. 15, No. 7, pp. 1185-1194.
6. Arya, S. P. S., Capuano, M. E. and Fagen, L. C., 1987, Some Fluid Modeling Studies of Flow and Dispersion Over Two Dimensional Low Hills, *Atmos. Environ.*, Vol. 21, No. 4, pp. 753- 764.
7. A. C. Vladut, R. M. Damian, M. Degeratu. C. I. Cosoiu , .A.-M. Georgescu. Flow simulation over a two-dimensional model hill. *University Polytechnica of Bucharest Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering*, Vol. 79, Iss. 3, 2017.
8. F. Auguste, C. Lac, V. Masson, D. Cariolle. Large-Eddy Simulations with an Immersed Boundary Method: Pollutant Dispersion over Urban Terrain. *Atmosphere* 2020, 11 (1), 113. <https://doi.org/10.3390/atmos11010113>.
9. M. Carpentieri. Pollutant dispersion in the urban environment. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology* (2013) – Vol. 12 (1) – pp. 5-8. DOI:10.1007/s11157-012-9305-8.
10. OpenFOAM 7.0 User's Guide. <https://cfm.direct/openfoam/user-guide-v7/>. Access data 05.09.2021.
11. Paraview. <https://www.paraview.org/>. (accessed 12.09.2021).
12. Жайнаков А. Ж. Математическое моделирование задачи прорыва дамбы [Текст] / А.Ж.Жайнаков, А.Ы.Курбаналиев // Вычислительные технологии. – Новосибирск: 2013. - Т. 18. - №3. - с. 12-21.
13. Жайнаков А. Ж. Верификация открытого пакета OpenFOAM на задачах прорыва дамб [Текст] / А.Ж.Жайнаков, А.Ы.Курбаналиев // Теплофизика и аэромеханика /// Институт теплофизики СО РАН. – Новосибирск: 2013. - Т. 20. - №4. - с. 461-472.
14. A. I. 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.
15. Курбаналиев А. Ы. Критическое сравнение различных версий пакета OpenFOAM на задаче моделирования водослива [Текст] / А.Ы.Курбаналиев, Б.Р.Ойчуева, А.Т.Калмурзаева, А.Ж.Жайнаков, Т.Ч.Култаев // Вычислительные технологии. – Новосибирск: 2021. - Т. 26. - №2. - с. 44-57.
16. Versteeg H. K., Malalasekera W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd Edition. Pearson Education Limited, 2007, 503p.



17. Ferziger J. H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. Berlin: Springer Verlag, 2002–42.
18. Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости [Текст]: Пер. с. англ. / С.В.патанкар. –М.: Энергоатомиздат. – 152с.