

А.А. Исахов¹, Ж.Е. Бекжігітова¹, П.Т. Омарова¹¹Казахский Национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы, Казахстан**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ
В УЛИЧНОМ КАНЬОНЕ***Аннотация*

В данном исследовании было выполнено моделирование динамики течения газа вблизи однопараметрической модели здания. Для изучения процесса трассировки газа были применены несколько типов барьеров различной высоты. В качестве индикаторного газа был выбран этилен - C₂H₄. Численное моделирование произведено с использованием осредненных по времени уравнений Навье-Стокса (RANS), с приближением Буссинеска, путем сравнения результатов моделирования с экспериментальными результатами известных авторов. По результатам исследования, было выяснено, что использование модели RANS в совокупности с k-ε Realizable (RLZ), k-ω SST (SST), DES k-ε (DES) моделями турбулентности дало практически сравнимые результаты с небольшими отклонениями, позволившими сделать выбор в пользу k-ε Realizable модели турбулентности. Кроме того, было выявлено, что с увеличением высоты барьера наблюдается увеличение удерживающих свойств в области между строением и барьером. В общем и целом, численные результаты соизмеримы с экспериментальными значениями, благодаря чему подтверждается корректность используемой математической и численной модели. Данные исследования могут быть применены в дальнейшем для более детального изучения влияния перпендикулярных потоков распространения загрязняющих веществ внутри городского каньона.

Ключевые слова: турбулентность, система уравнений Навье-Стокса, k-ε модель турбулентности, метод SIMPLE, распространение загрязнителей в уличном каньоне

*Аңдатпа*А.А. Исахов¹, Ж.Е. Бекжігітова², П.Т. Омарова³¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы қ., Қазақстан**ТҰРҒЫН ҮЙ АУМАҒЫНДАҒЫ ЛАСТАУШЫ ЗАТТАРДЫҢ ТАРАЛУЫНЫҢ САНДЫҚ МОДЕЛДЕУІ**

Бұл зерттеуде біз ғимараттың бір параметрлі моделіне жақын жерде газ ағынының динамикасын модельдедік. Газдың таралу процесін зерттеу үшін әртүрлі биіктіктегі кедергілердің бірнеше түрлері қолданылды. Этилен - C₂H₄ индикаторлы газ ретінде таңдалды. Модельдеу нәтижелерін белгілі авторлардың тәжірибелік нәтижелерімен салыстыру арқылы сандық модельдеу уақыт бойынша орташа есеппелген Навье-Стокс (RANS) теңдеулерінің, Буссинеска жуықтауымен жүргізілді. Зерттеу нәтижелері бойынша RANS моделін k-ε Realizable (RLZ), k-ω SST (SST), DES k-ε (DES) турбуленттік модельдерімен бірге қолдану сәл ауытқулармен іс жүзінде салыстырмалы нәтижелер берді, бұл мүмкін болатын турбуленттіліктің кез-келген моделін таңдауға мүмкіндік берді. Сонымен қатар, тосқауылдың биіктігінің өсуімен құрылым мен кедергі арасындағы аймақта ұстап қалу қасиеттерінің жоғарылағаны байқалды. Жалпы алғанда, сандық нәтижелер эксперименттік шамаларға сәйкес келеді, бұл пайдаланылған математикалық және сандық модельдердің дұрыстығын растайды. Болашақта бұл зерттеулер қалалық каньондағы ластаушы заттар таралуының перпендикуляр ағындарының әсерін неғұрлым егжей-тегжейлі зерттеу үшін қолданыла алады.

Түйін сөздер: турбуленттілік, Навье-Стокс теңдеулер жүйесі, k-ε турбуленттік модель, SIMPLE әдісі, ластаушы заттардың көше каньонына таралуы.

*Abstract***NUMERICAL MODELING DISTRIBUTION OF CONTAMINATING SUBSTANCES
IN STREET CANYONS**Issakhov A.A.¹, Bekzhigitova Zh.E.² Omarova P.T.³¹Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

In this study, we simulated the dynamics of the gas flow near a one-parameter model of the building. To study the gas tracing process, several types of barriers of various heights were applied. Ethylene - C₂H₄ was chosen as an indicator gas. Numerical modeling was performed using the time-averaged Navier-Stokes (RANS) equations, with the Boussinesq approximation, by comparing the simulation results with the experimental results of famous authors. According to the results of the study, it was found that the use of the RANS model in conjunction with k-ε Realizable (RLZ), kw SST (SST), DES k-ε (DES) turbulence models yielded practically comparable results with small deviations, which made it possible to choose k-ε Realizable turbulence models. In addition, it was found that with an increase in the height of the barrier, an increase in the retention properties in the region between the structure and the barrier is observed. In general, the numerical results are commensurate with the experimental values, which confirms the correctness of the mathematical

and numerical models used. These studies can be applied in the future for a more detailed study of the influence of perpendicular flows of the spread of pollutants within the urban canyon.

Keywords: turbulence, Navier-Stokes system of equations, $k-\epsilon$ turbulence model, SIMPLE method, spread of pollutants in a street canyon

Введение

В настоящее время развитие экологического кризиса породило целый ряд проблем, связанных с ухудшением качества окружающей человека природной среды. На здоровье человека одним из сильно влияющих факторов является качество воздуха [1]. Ежегодно миллионы людей умирают преждевременно от болезней, связанных с загрязнением воздуха. Загрязнение воздуха различными вредными веществами может привести к заболеванию органов человека, в том числе болезни органов дыхания. Эти проблемы продолжают развиваться в результате индустриализации и урбанизации образа жизни человека, истощения энергетических и сырьевых ресурсов.

В городских уличных каньонах вентиляция через динамические процессы значительно отстает по сравнению с открытым пространством [2]. Выбросы от транспортных средств, как газообразных, так и частиц, преобладают среди различных источников антропогенных загрязнителей [3]. В уличных каньонах выхлопные газы автомобилей являются одной из наиболее серьезных форм загрязнения воздуха, которым подвергаются жители.

Прогнозирование загрязняющих веществ вокруг зданий является одним из наиболее важных предметов в области ветроэнергетики и кондиционирования воздуха. Многие исследования были проведены с использованием испытаний в аэродинамической трубе для прогнозирования рассеивания загрязняющих веществ вокруг зданий [4].

После классификации режима потока городских уличных каньонов был проведен ряд исследований по потоку и рассеиванию загрязняющих веществ в городских уличных каньонах [5]. Факторы влияния, рассмотренные до настоящего времени, включают соотношение сторон каньона (например, форму крыши [6], турбулентность потока над каньоном [7], неизотермический эффект, химические реакции загрязнителей [8] и деревьев [9]). Традиционно экспериментальные методы - обычно испытания в аэродинамической трубе - использовались для анализа рассеивания загрязняющих веществ в городских уличных каньонах [10].

Однако эксперименты отнимают много времени и требуют больших затрат и предоставляют ограниченный объем данных в отдельных точках. Испытания в аэродинамической трубе сталкиваются с рядом трудностей и имеют много ограничений при анализе чрезвычайно сложного процесса турбулентной диффузии вокруг зданий, расположенных в пограничных слоях атмосферы. Одной из таких трудностей является обработка плавучестью в рассеянных загрязнителях.

Улучшение вычислительной мощности в последние годы позволило применить модели вычислительной гидродинамики (CFD) для анализа рассеивания загрязняющих веществ [5]. Численные методы, основанные на вычислительной гидродинамике (CFD), могли бы преодолеть эту трудность и облегчить точное исследование влияния плавучести на поля потока и дисперсии.

Как отмечалось в нескольких работах [11], значительное количество исследований использовало метод CFD для изучения рассеивания загрязняющих веществ вокруг зданий.

Посадка деревьев на дорогах является распространенным явлением в борьбе с загрязнением воздуха. В нескольких работах [12] была дана оценка их влияние на воздушный поток и перенос загрязняющих веществ на улице. В работе [13] применили трехмерную численную модель с моделью турбулентности EARSM $k-\epsilon$ для исследования поля воздушного потока и концентрации загрязняющих веществ в изолированном идеальном уличном каньоне с разными крышами и с посадкой деревьев, которые упрощены как кубовидные пористые среды над землей и расположены в центре улицы.

В данной работе были исследованы трехмерные (3D) тестовые задачи, выполнены вычислительные моделирование гидродинамики для полей потока и рассеяния вокруг изолированной кубической модели здания с трассирующими газами, выходящими с обратной стороны здания. Полученные результаты сравнивались и сопоставлены с экспериментальными данными.

Математическая модель

Воздушный поток в городской местности считается изотермическим, а эффект плавучести не учитывается. Усредненные по времени поля скорости и концентрации прогнозируются с использованием усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS). Данные

экспериментов в аэродинамической трубе, проведенных Tominaga и Stathopoulos [14], используются для проверки вычислительной модели.

Проверка модели важна для исследований Fluent перед дальнейшим анализом. Точность текущей модели *Fluent* демонстрируется путем сравнения с экспериментальной базой, полученной из аэродинамической трубы в Институте промышленных наук Токийского университета [14]. Значения D и U_D составляли 0.2м и 0.4м/с. Интенсивность турбулентности в продольном направлении на высоте здания D составляла приблизительно 20%. На рисунке 1 показан вертикальный профиль падающего излучения безразмерной средней скорости U/U_D , здесь U определяется по формуле:

$$U = \begin{cases} 0.564 * \left(\frac{(z - 0.02)}{0.5} \right)^{\frac{1}{5}}, & \text{if } z < 0.5 \\ 0.564, & \text{if } z > 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

Этилен (C_2H_4) использовался в качестве индикаторного газа и выделялся в центре уличного дна с концентрацией 312.5 ppm. Загрязнитель был выпущен точечным источником в их эксперименте.

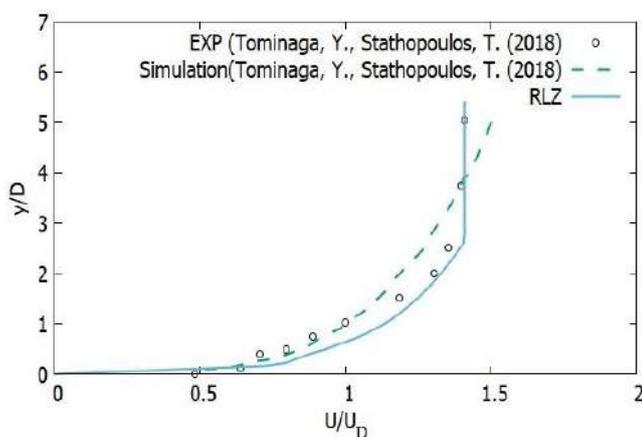


Рисунок 1. Профили инцидентности (а) средней продольной безразмерной скорости U/U_D .

Верификация математической модели

Рисунок 2 иллюстрирует проанализированную ситуацию потока. Кубическая модель здания с высотой D расположена в турбулентном пограничном слое. Источник газа прямоугольной формы с длиной стороны $0.025D$ установлен на уровне земли в области рециркуляции за зданием. Скорость w_s газа на выходе составляет $0.5U_D$, при это U_D определяется как средняя скорость против ветра при высоте D , где D равно 0.2.

Граничные условия устанавливаются соответствующим образом [15], на входе Inlet и на выходе Outlet указываются как *velocity inlet* и *pressure outlet*, верхняя стена Upper boundary и боковые стены Side boundary указываются как *symmetry*, здание Building и нижняя стена Floor указываются как *wall*. Соответственно, где выбрасывается газ Gas exit указывается как *velocity inlet*.

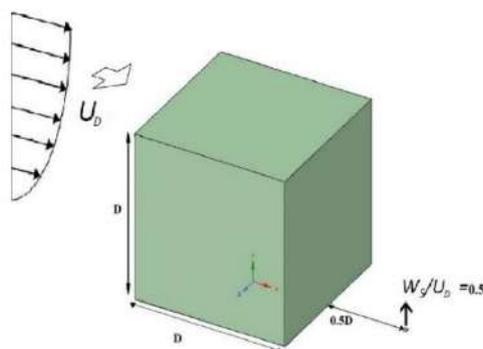


Рисунок 2. Поле модели потока

Вычислительная область охватывает объём $L(x) \times H(y) \times W(z)$, где L равно $21D$ и H равно $5.4D$, а W равно $9.7D$. Расстояние между наветренной гранью куба и входом домена составляет $5.0D$ (рисунок 3). Соотношение между турбулентной кинетической энергией κ и интенсивностью турбулентности I имеет вид:

$$\kappa = \frac{3}{2}(u_{avg}I)^2 \quad (2)$$

где u_{avg} - средняя скорость потока. ε определяется из соотношения:

$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{\kappa^{3/2}}{l} \quad (3)$$

где C_μ - является эмпирической константой, указанной в модели турбулентности (приблизительно 0.09). Определение l обсуждалось ранее. Интенсивность турбулентности скорости выхлопа на выходе установлена на 10%.

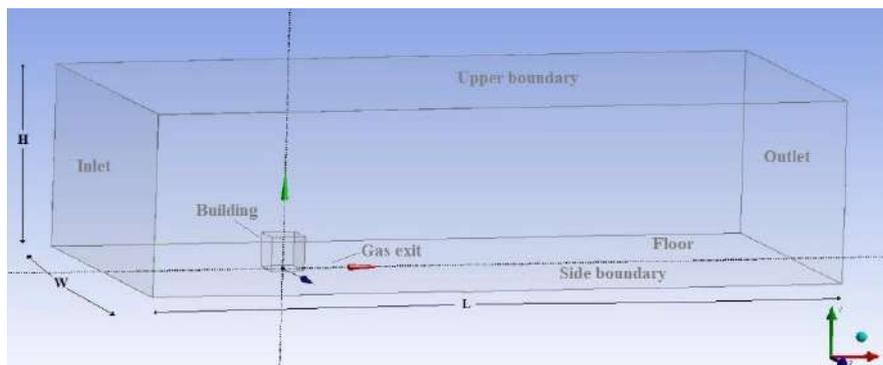


Рисунок 3. Вычислительная область и граничные условия

Вычислительная область состоит из двух подобластей: большая подобласть состоит из более грубой вычислительной сетки, а маленькая из сгущенной сетки. Была использована вычислительная сетка, состоящая из 4982712 четырехгранных элементов, рисунок 4(b), при этом внутренняя подобласть имела размер $4e-03$, рисунок 4(a). А также были применены сгущение сетки на выходе газа на $1e-03$. Было сделано сгущение в правой стенке здания на $1e-03$, рисунок 4(c). Реализуемая модель $k - \varepsilon$ была принята в качестве модели турбулентности.

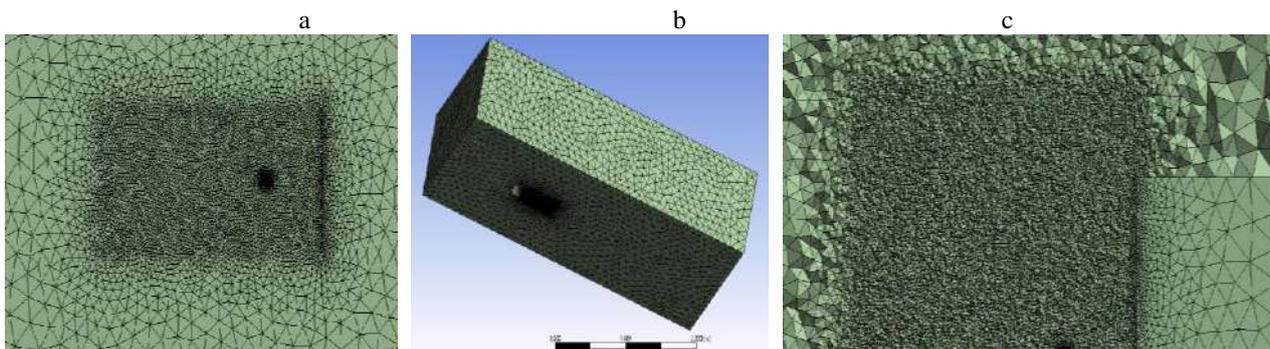


Рисунок 4. Расчетные сетки для анализа чувствительности сетки: (a) вертикальное сечение в центральной плоскости, (b) сетка расчетной области, (c) горизонтальное сечение.

На рисунке 5 показано сравнение данных с результатами с работы [14], а также с данными эксперимента для средней концентрации. В каждом из случаев можно видеть хорошее соответствие между вычислениями и экспериментально полученными данными.

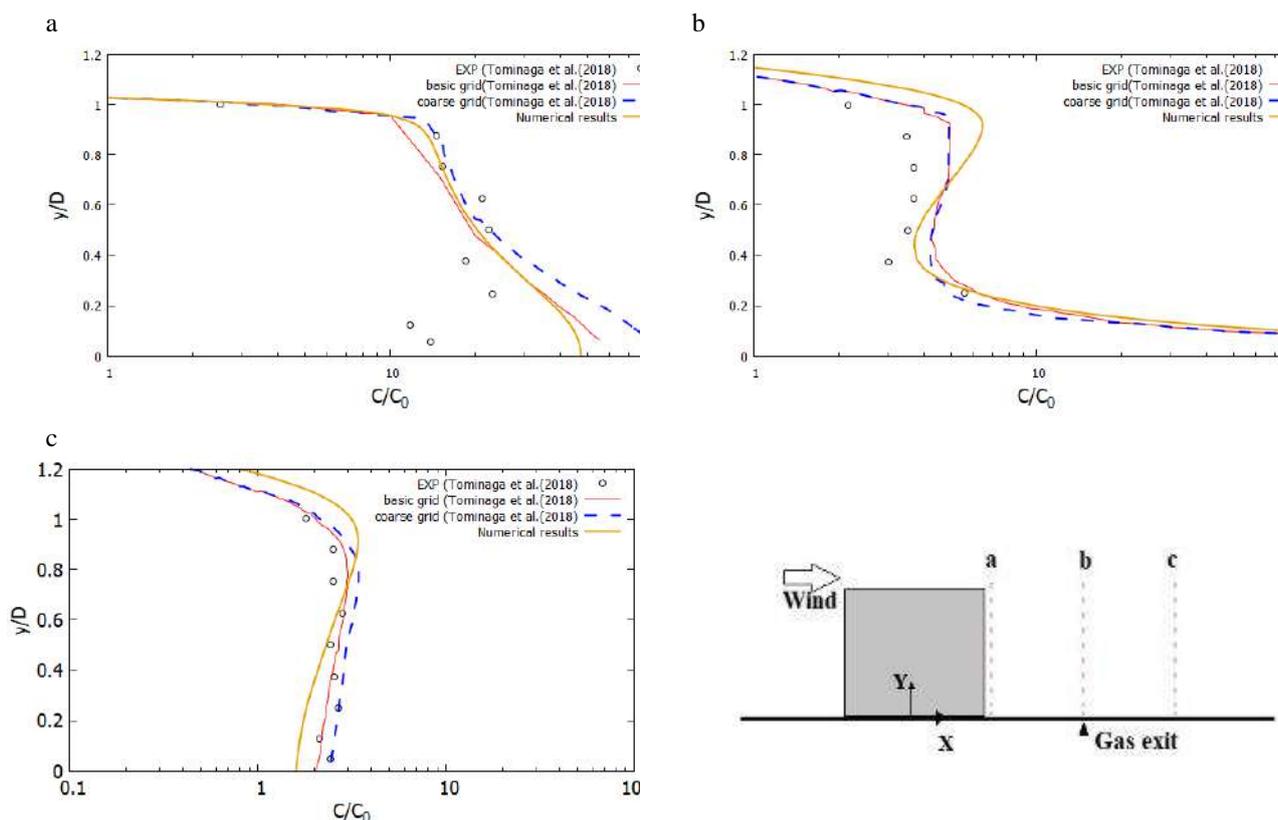


Рисунок 5. Результаты анализа чувствительности к сетке: средние значения концентрации C/C_0 вдоль трех вертикальных линий в центральной части: (a) $x/D=0.55$, (b) $x/D=1.0$ и (c) $x/D=1.5$.

На рисунке 6 сравниваются вертикальные контуры средних продольных скоростей U/U_D (рисунок 6.б) с результатами экспериментальными данными работы [14] (рисунок 6.а). В отличие от графика а, можно заметить, что вихрь скорости расположен ниже.

Также видно, что вихрь расположен вдоль стены.

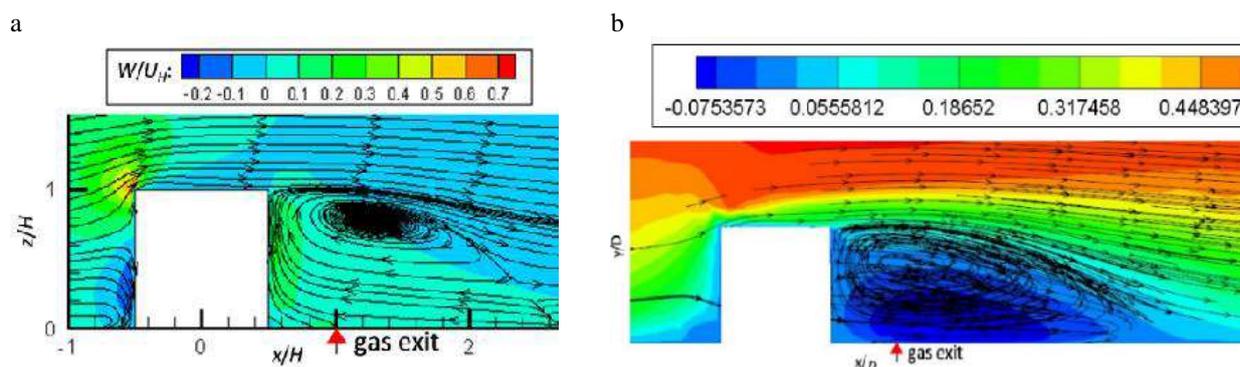


Рисунок 6. Обводы и контуры вертикальной составляющей скорости W/U_D в центральной части.

Численные результаты для различных моделей турбулентности

Для проверки достоверности выбранной модели турбулентности при исследовании движения газа. Для этого были проведены расчеты и полученные результаты далее будут сравниваться с данными, полученными в ходе эксперимента [14].

Используется и сравниваются три типа моделей турбулентности: модель realizable $k - \varepsilon$ (RLZ), и модель сдвиг переноса напряжений (SST) $k - \omega$ (SST), модель realizable $k - \varepsilon$ DES (DES). На рисунке 7 сравниваются вертикальные профили средних концентраций за зданием с различными моделями

турбулентности. Распределений концентраций на вертикальных линиях, за исключением $k - \omega$ SST, в общих распределениях среди двух других моделей турбулентности не обнаружено существенных различий, которые хорошо воспроизводят распределения концентраций в эксперименте [14].

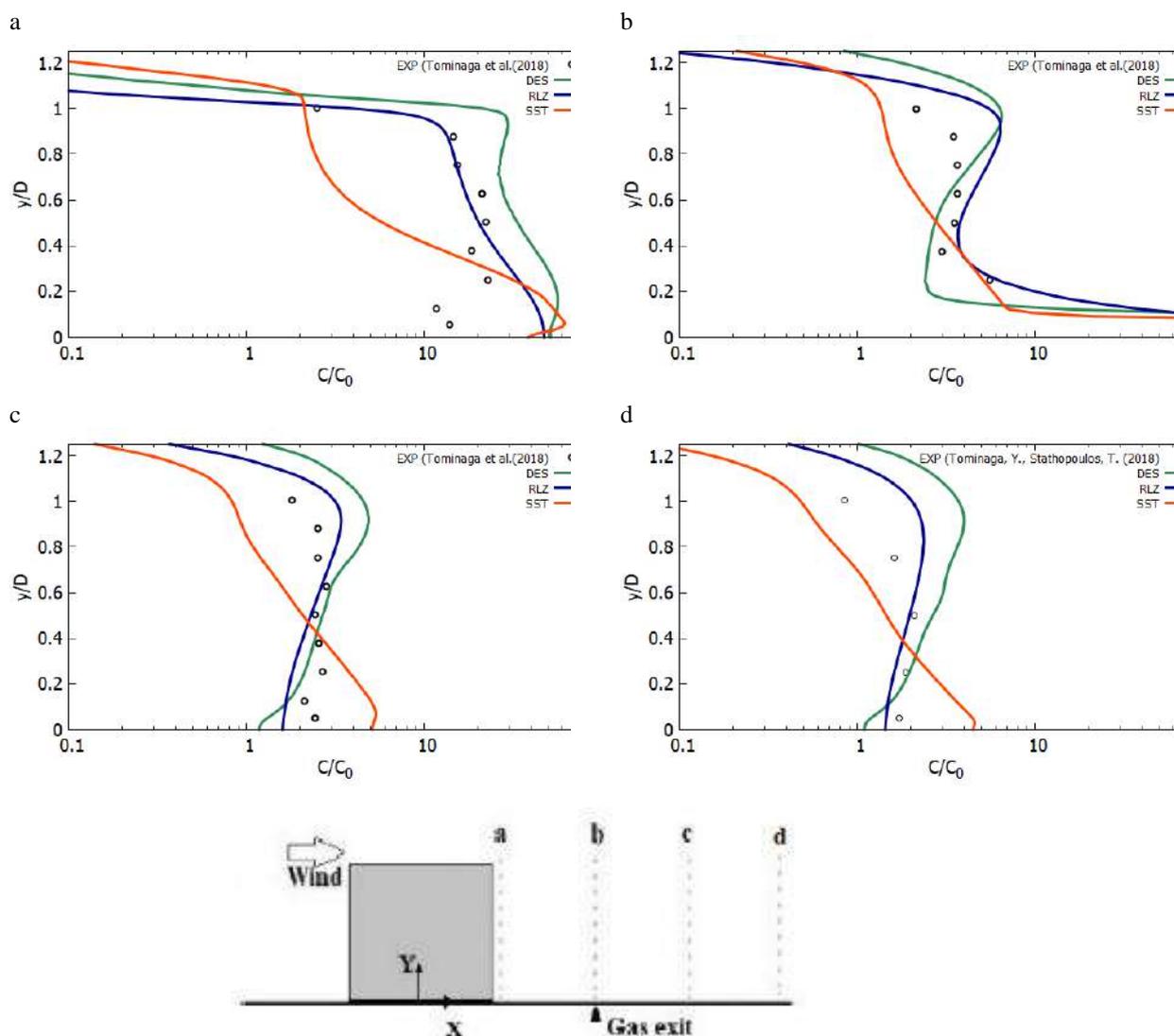


Рисунок 7. Вертикальные профили средних концентраций C/C_0 за зданием, полученные с помощью различных моделей турбулентности: (a) $x/D=0.55$, (b) $x/D=1.0$, (c) $x/D=1.5$ и (d) $x/D=2.0$.

Модель realizable $k - \varepsilon$ обеспечивает наилучшее согласие с экспериментальными данными по средним концентрациям. Из-за этого в дальнейших вычислениях будут использованы модель турбулентности realizable $k - \varepsilon$.

Численные результаты 3D моделирование с применением ограждений

В данной задаче были исследованы поведение газа при использовании барьера. Для этого были использованы четыре разных по высоте барьеров: 0.1D, 0.2D, 0.3D и 0.4D.

На рисунке 8 показано кубическая модель здания и барьер расположены в турбулентном пограничном слое. Указание всех размеров приводилось ранее.

На рисунке 9 сравниваются уровень концентраций с барьерами разной высотой. Из полученных данных можно заметить, что на всех графиках минимальный уровень загрязнений концентраций показывает здание с барьером высотой 0.4D, кроме графика 9b. На рисунке 9a видно, что наименьшая концентрация при барьере с наибольшей высотой 0.4D. Отсутствие барьера показывает наихудшие результаты с максимальным значением концентрации. На рисунках 9c и 9d уровень концентраций

почти одинаков. На рисунке 9b барьер с высотой $0.4D$ сначала дает минимальную концентрацию, однако затем она начинает расти и предпочтительнее результаты показывает случай с отсутствием барьера.

Высота барьеров заметно оказывает влияние на распространение газа. На рисунке 10 иллюстрируются трехмерные графики контура концентраций этилена C_2H_4 , со зданием с разной высотой барьера - $0.1D$, $0.2D$, $0.3D$ и $0.4D$.

Из-за высоты барьера можно видеть, что выбрасываемая концентрация начинает снижаться. По сравнению здания с барьером высотой $0.1D$ и здания с высотой 0.3 , $0.4D$ количество выбрасываемого газа уменьшилось на крыше сооружения.

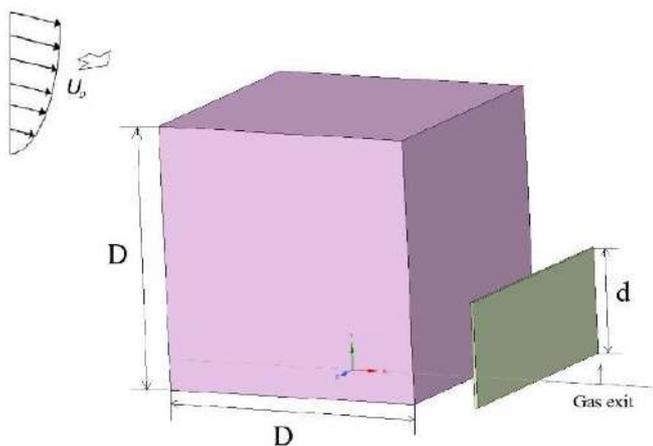


Рисунок 8. Поле модели потока

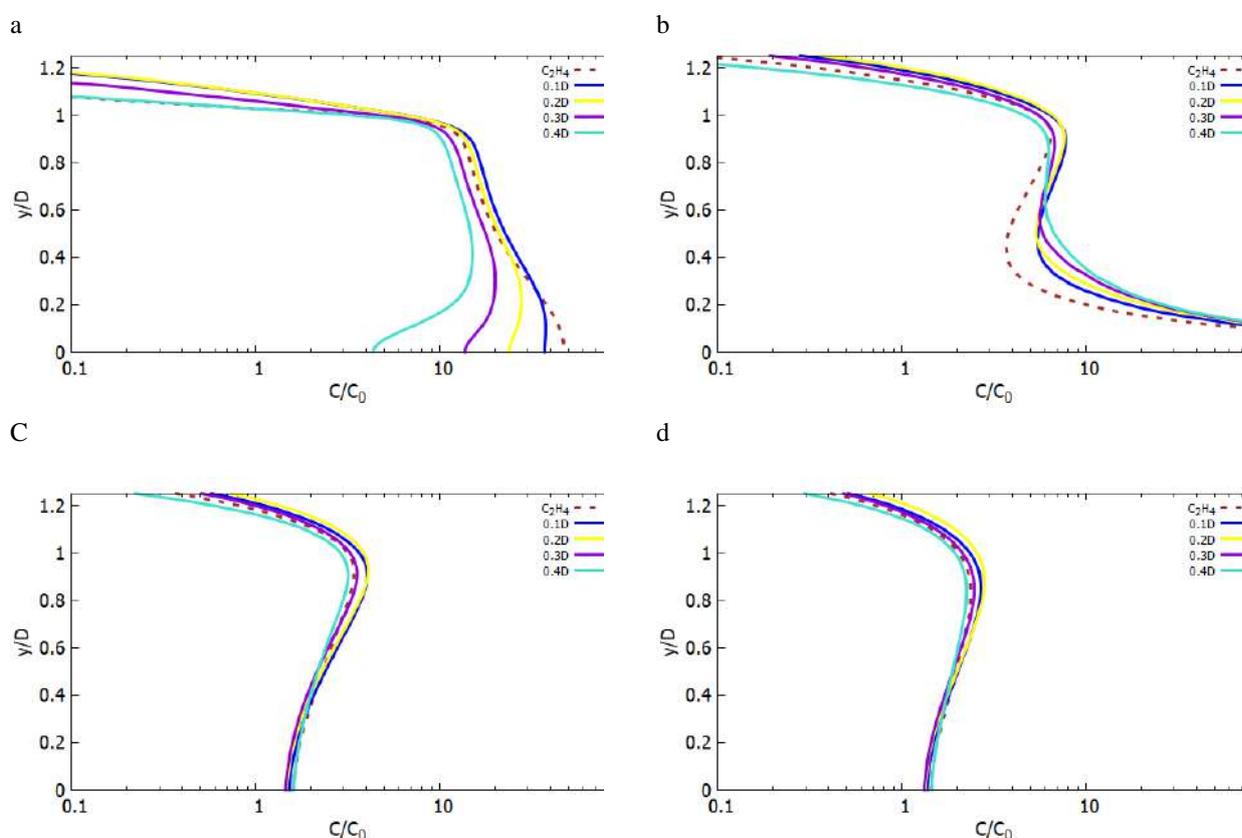


Рисунок 9. Профили средних концентраций этилена C_2H_4 с барьером разными высотами.

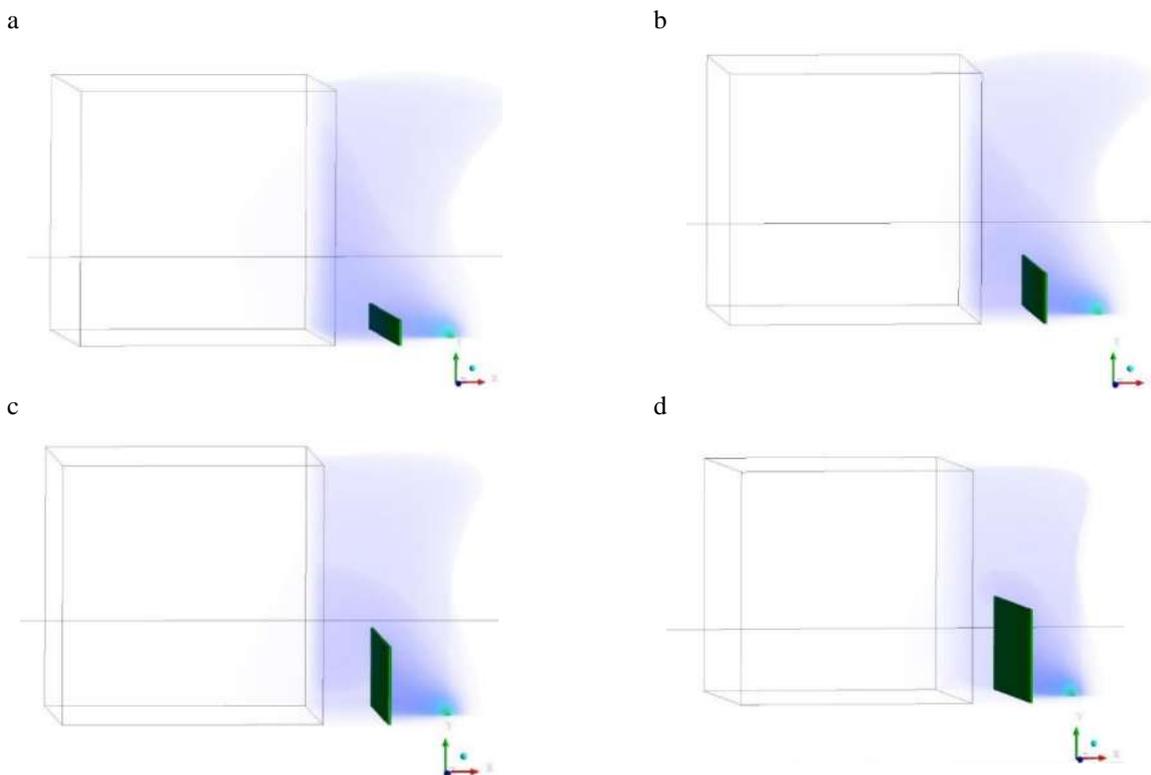


Рисунок 10. Трехмерные графики контура концентраций этилена C_2H_4 : (a) барьер с высотой $0.1D$, (b) барьер с высотой $0.2D$, (c) барьер с высотой $0.3D$, (d) барьер с высотой $0.4D$

Заключение

В ходе выполнения работы была проверена точность трех турбулентных моделей ($k-\varepsilon$, $k-\omega$, DES) на тестовой задаче пересекающихся потоков. Также был осуществлен анализ численных результатов с экспериментальными данными и результатами моделирования известных авторов. Совпадение результатов тестовой и исследуемой задачи после их изучения и сопоставления являются хорошими. После анализа точности, эффективности и скорости решения турбулентных моделей, среди всех моделей можно выделить *realizable k- ε* , как самую оптимальную турбулентную модель, для перехода к реальным размерам. Все параметры геометрии, граничные и начальные условия тестовой задачи остались прежними. Было взято четыре разных барьера с разными высотами. С ростом высоты барьера наблюдалось увеличение удерживающих свойств в области между строением и барьером.

В целом, численные результаты удовлетворительно сравниваются с данными экспериментов и дают большую уверенность в эффективности моделирования. В результате проведенного исследования, полученные данные можно применять при дальнейших изучениях проблем, связанных с загрязнением уличных каньонов.

Список использованной литературы

- 1 Kampa M., Castanas E. (2008), "Human health effects of air pollution", *Environ. Pollut.*, Vol. 151, pp. 362–367.
- 2 Cheng W.C., Liu C.H., Leung D.Y.C. (2008). "Computational formulation for the evaluation of street canyon ventilation and pollutant removal performance", *Atmospheric Environment*, Vol. 42: pp. 9041–9051.
- 3 Bo M., Salizzoni P., Clerico M., Buccolieri R. (2017), "Assessment of indoor-outdoor particulate matter air pollution: A review", *Atmosphere*, Vol. 8, pp. 136.
- 4 Tominaga Y., Stathopoulos T. (2016), "Ten questions concerning modeling of near-field pollutant dispersion in the built environment", *Build. Environ.*, Vol. 105, pp. 390–402.
- 5 Blocken B., Tominaga Y., Stathopoulos T. (2013), "CFD simulation of micro-scale pollutant dispersion in the built environment", *Build. Environ.*, 64, pp. 225–230.
- 6 Li X.X., Liu C.H., Leung D.Y.C. (2008), "Large-eddy simulation of flow and pollutant dispersion in high-aspect-ratio urban street canyons with wall model", *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 129, pp. 249–268.

- 7 Kikumoto H., Ooka R. (2012), "A study on air pollutant dispersion with bimolecular reactions in urban street canyons using large-eddy simulations", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, pp. 104–106.
- 8 Baker J., Walker H.L., Cai X. (2004), "A study of the dispersion and transport of reactive pollutants in and above street canyons—a large eddy simulation", *Atmos. Environ*, Vol. 38, pp. 6883–6892.
- 9 Salim S.M., Cheah S.C., Chan A. (2011), "Numerical simulation of dispersion in urban street canyons with avenue-like tree plantings: comparison between RANS and LES", *Build. Environ*, Vol. 46, pp. 1735–1746.
- 10 Schatzmann M., Leidl B. (2011), "Issues with validation of urban flow and dispersion CFD models", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, Vol. 99, pp.169–186.
- 11 Tominaga Y., Stathopoulos T. (2013), "CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques", *Atmos. Environ*, Vol. 79, pp. 716–730.
- 12 Moonen, Gromke, Dorer, (2013), "Performance assessment of Large Eddy Simulation (LES) for modeling dispersion in an urban street canyon with tree planting", *Atmos. Environ*, Vol. 75, pp. 66–76.
- 13 Ding S., Huang Y., Cui P., Wu J., Li M., Liu D. (2019), "Impact of viaduct on flow reversion and pollutant dispersion in 2D urban street canyon with different roof shapes - Numerical simulation and wind tunnel experiment". *Science of The Total Environment*, Vol. 671, pp. 976–991.
- 14 Tominaga Y., Stathopoulos T. (2018), "CFD simulations of near-field pollutant dispersion with different plume buoyancies", *Building and Environment*.
- 15 Tominaga Y., Mochida A., Yoshie R., Kataoka H., Nozu T., Yoshikawa M., Shirasawa T. (2008), "AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings", *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn*, Vol. 96, pp. 1749–1761.

МРНТИ 373.5. 091
УДК 372.8.

DOI: <https://doi.org/10.51889/2020-1.1728-7901.15>

М.Т. Искакова¹, А.К. Оразбаева¹

¹ Абай атындағы Қазақ Ұлттық педагогикалық университеті, Алматы қ, Қазақстан

ЖАЛПЫ БІЛІМ БЕРЕТІН МЕКТЕПТЕ ЛОГИКАЛЫҚ ЕСЕПТЕРДІ ШЕШУГЕ БАУЛУ

Аңдатпа

Мектеп оқушыларының математикалық білімін логикалық есептерді шығару арқылы қалыптастыру қазіргі заманның бірден бір сұранысы. Логикалық есептерді шығаруда жаттанды формулаларды пайдаланбай, есептердің берілген шартына тереңінен үніліп талдау жүргізу арқылы есептерді шығару оқушылардың ойлау қабілетінің артуына көмектеседі. Бұл мақаладағы есептер Қазақстан Республикасының кейбір облыс және қалаларының аймақтық ерекшеліктеріне негізделіп құрастырылған. Құрастырылған есептер жалпы білім беретін мектептің 6-сыныбының білім мазмұнына сай болып табылады. Мәтінді есептің математикалық моделін санның бөлігін табу, бөлігі бойынша санды табу, Эйлер-Венн диаграммасы, пропорция, жолды, жылдамдықты есептеу, схема құру арқылы оқушы есеп шығаруға дағдыланады. Есептер өз жерінің табиғаты туралы болғандықтан, оқушылардың қызығушылығын оятып, өз елінің патриоты болуына ықпал жасайды.

Түйін сөздер: логика, математикалық модель, Эйлер-Венн диаграммасы, схема.

Аннотация

М.Т. Искакова¹, А.К. Оразбаева¹

¹Казахский национальный педагогический университет им. Абая, г. Алматы, Казахстан

ОБУЧЕНИЕ РЕШЕНИЮ ЛОГИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ШКОЛЕ

Формирование математических знаний школьников посредством решения логических задач является одним из самых востребованных в современном мире. Решение задач с помощью глубокого анализа заданных условий задач, без использования запоминающихся формул при решении логических задач, способствует повышению мышления учащихся. Задачи в данной статье составлены на основе региональных особенностей некоторых областей и городов Республики Казахстан. Составленные задачи соответствуют содержанию образования 6 класса общеобразовательной школы. Математическая модель текстовой задачи, находка чисел по части, диаграмма Эйлера-Венна, пропорция, вычисление пути, скорости, построение схемы способствуют формированию навыков решению задач учеников. Задачи, связанные с природой своей земли, вызывают интерес учащихся и способствуют тому, чтобы быть патриотом своей страны.

Ключевые слова: логика, математическая модель, Эйлер-Венн диаграмма, схема.