

УДК 519.62  
МРНТИ 27.35.21; 27.35.47; 27.41.19

<https://doi.org/10.55452/1998-6688-2024-21-2-152-169>

<sup>1\*</sup>Нигметова А.,

магистрант, ORCID ID: 0009-0004-5395-4569, e-mail: a.nygmotova@kbtu.kz

<sup>1</sup>Исахов А.,

профессор, ORCID ID: 0000-0002-1937-8615, e-mail: alibek.issakhov@gmail.com

<sup>1</sup>Казахстанско-Британский технический университет, 050000, г. Алматы, Казахстан

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОГО ПОТОКА И ПЕРЕНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ПРИМЕСЕЙ С ЦЕЛЬЮ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ НА СЕЛИТЕЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЯХ

### Аннотация

Целью данного исследования является анализ турбулентного рассеивания загрязняющих веществ в г. Алматы, Казахстан, вызванного выбросами автотранспорта. Изучалось влияние окружающей среды и зданий на распространение концентрации загрязнения, в данном случае этилена. Была построена трехмерная модель, в точности описывающая существующую улицу в городе. Турбулентный поток воздуха и концентрации были исследованы с помощью математической модели конвекции в полости, и задача решена методом SST k-omega. Для решения связи скорости и концентрации применялся алгоритм SIMPLE. При сравнении полученных результатов и известных тестовых данных схожесть выявленных результатов показала правильность используемых методов и алгоритмов. По итогу были проанализированы результаты распространения загрязняющих веществ при наличии барьера различной высоты: 1 м, 2 м и 3 м. Результаты показывают, что наличие барьера положительно влияет на удержание загрязнений. Также высота данных барьеров играет важную роль, поэтому при планировании и строительстве надо отталкиваться от результатов моделирования и особенностей данной территории. Это доказывают выделяющиеся различия количества концентрации в один и тот же момент времени для всех случаев.

**Ключевые слова:** загрязнение воздуха, уличный каньон, SST k-omega, высокая концентрация, барьеры.

### Введение

Загрязнение в городах – одна из серьезнейших экологических проблем по всему миру, которая каждый год уносит миллионы жизней. Казахстан входит в список топ-40 самых загрязненных стран на планете, а г. Алматы занимает второе место по уровню загрязнения в стране [1]. Из-за своего расположения у подножия гор и неблагоприятных климатических условий в городе накапливаются опасные частицы, образующие смог. Это негативно влияет на здоровье, вызывая хронические болезни, такие как астма и рак, и замедляет городские инновации, влияя на производство и предпринимательство [2].

Уровень загрязнения зависит от многочисленных факторов: выбросов от автомобилей, работы электрических станций и других. По статистике, 70% загрязнения воздуха происходит из-за выбросов вредных газов из выхлопных труб автомобилей. В частности, это зависит от вида используемого бензина или срока эксплуатации автомобиля. Недавние исследования подтверждают, что вещества, выбрасываемые автомобилями, оказывают крайне негативное воздействие на здоровье человека и экосистему [5–7]. Эти частицы проникают в легкие и ослабляют их защитные функции. Испарение и вытеснение топлива из бака выбрасывают углеводороды, включая бензол, толуол, этан, этилен и пентан.

Во многих странах урбанизация ведет к расширению городов. Из-за роста стоимости жилья в центре большинство людей переезжают на окраины, что вызывает значительную

дневную миграцию и автомобильные пробки. Это усиливает загрязнение окружающей среды из-за концентрированных автомобильных выбросов [8].

Борьба с загрязнением воздуха требует комплексных мер, таких как внедрение чистых технологий в промышленности и транспорте, улучшение системы общественного транспорта, а также контроля за выбросами вредных веществ. Градостроительство и дизайн строящегося города также влияют на условия вентиляции в городах [9]. В целях решения данной проблемы застройка должна быть спланирована и ориентирована так, чтобы расширить проникновение воздуха по максимуму [10]. Данная проблема привела ко множеству видов исследований, изучающих влияние городской структуры на распространение воздуха. В основном для этих исследований используются так называемые городские каньоны, где наименьший уровень проветривания и, следовательно, наиболее загрязненные районы. В 2021 г. в регионе Цзин-Цзинь-Цзи в Китае ученые Ze Liang et al. [11] провели исследование о взаимосвязи загрязнения воздуха и формы города, особенно в ночное время. Они предложили изменить форму города, уменьшив ее фрактальную размерность и правильно удлинив, что особенно важно для районов с высоким уровнем загрязнения, чтобы снизить его воздействие.

Из-за поступающей солнечной радиации внутри уличного каньона температура выше, чем наверху. Неправильная постройка зданий и жилых домов очень влияет на вентиляцию данных каньонов. В г. Тулуза были исследованы два варианта реконструкции города после сравнения с реальными данными. Увеличение высоты шумовых барьеров не сильно улучшает воздух, а удаление зданий ухудшает его в некоторых местах. Однако сохранение зданий и их способность переносить загрязнения на большую высоту могут улучшить качество воздуха [12]. А чтобы улучшить вентиляцию в городских районах с многоэтажными зданиями, нужно строить их разной высоты и не закрывать внутренние пространства [13]. Проводятся также исследования, использующие пористую среду для изучения влияния барьеров в виде зеленых инфраструктур, к примеру кроны деревьев, на распространение загрязнения. По результатам работы Shi et al. [14] увеличение связности и уменьшение фрагментации зеленых зон улучшит качество городской среды и сделает ее более экологически устойчивой. Но надо учитывать, что с увеличением глубины каньона влияние деревьев ограничивается. Дополнительно рекомендуется для наветренной стороны использовать деревья с большой кроной, в то время как для подветренной – с меньшей. И при сильном ветре лучше всего использовать высокие деревья с редкой листвой [15]. В другом исследовании Lu Zhang et al. [16] оценивали эффективность разных конфигураций растительности. Оказалось, что при ветре, идущем перпендикулярно улице, растения работают лучше, чем при косом ветре. Тип и расположение деревьев играют более важную роль, чем их общая площадь, в снижении уровня загрязнения воздуха. При этом самая экономичная и разумная плотность деревьев составляет 30%, а объем крон для уменьшения воздушных частиц в городских парках составляет  $1.8 \text{ м}^3/\text{м}^2$  [17].

Для решения проблем загрязнения ученые проводят эксперименты, чтобы определить оптимальные конфигурации городской геометрии. В одном из таких исследований Craig et al. [18] использовались два метода математической оптимизации: первый метод максимизирует показатели поочередно, а второй определяет расположение точек минимума загрязнения, рассматривая городскую геометрию и направления ветра. Локально оптимальная точка предоставляет лучшую геометрию города для наихудшего метеорологического сценария. В другом исследовании Gergely Kristóf et al. [19] используют аппроксимацию городского навеса в виде бесконечной двумерной сетки с заданной структурой застройки, которая также учитывает источники загрязнений. Благодаря таким работам с помощью моделирования можно выявить численные результаты. Исследования, которые проводятся с помощью математической модели с использованием численного моделирования CFD, наиболее эффективны и экономичнее и именно по этой причине часто используются учеными из разных стран [20–24]. Для других видов исследований требуется много ресурсов и затрат. Например, Fusuo Xu et al. [21] использовали метод компьютерного моделирования (CFD) и динамическую сетку для изучения, как форма обочины и движение транспортных средств влияют на воздушный поток

и вентиляцию в уличных каньонах. В 2018 г. Francisco Toja-Silva et al. [22] использовали CFD для моделирования рассеивания выбросов CO<sub>2</sub> от тепловой электростанции, учитывая распределение зданий, плотность застройки в районах г. Мюнхена, Германия. Исследование предлагает новое уравнение для расчета вертикальной дисперсии газа в городской среде. Также CFD использовали Xiangwen Fu et al. [23] для того, чтобы вычислить, как геометрия уличных каньонов влияет на распределение загрязняющих веществ в г. Пекине. А в 2021 г. Li et al. [24] изучали оптимальные методы для проектирования зеленых зон в городских парках, где для исследования использовались модели CFD, включая стандартную k-ε модель, основанную на подходе RANS. При проведении исследований в области механики жидкости необходимо использовать набор фундаментальных уравнений для течения жидкости, таких как уравнение неразрывности и закон сохранения импульса. Кроме того, для эффективного решения этих уравнений исследователи должны выбрать вычислительные методы. В 2019 г. было проведено исследование, где Santiago et al. [25] оценивали эффективность зеленых барьеров в снижении концентрации загрязняющих частиц в воздухе города Испании Памполе с использованием моделей CFD. Они выяснили, что наилучшая конфигурация барьера зависит от расположения источника загрязнения, включая типичную структуру потока на этой улице. Похожее исследование было проведено в г. Аугсбурге, Германия. Работа Ioannidis et al. [26] посвящена разработке и применению CFD-модели для рассеивания твердых частиц, CO и NO<sub>x</sub> в результате транспортной активности в оживленном районе. Nguyen et al. [27] создали модель, которая предназначена для изучения структуры потока и рассеивания загрязняющих веществ в каньонах городских улиц с различными геометрическими конфигурациями. Где также для моделирования переноса загрязняющих веществ используется скалярное уравнение переноса, связанное с уравнениями импульса воздушного потока, выводимыми из уравнений Рейнольдса, усредненных по Навье-Стоксу (RANS). Необходимо создать точную трехмерную геометрическую модель той территории, где мы проводим исследования на распространение загрязняющих веществ. Нужно отметить, что можно делать и двумерную модель. В исследовании Mei et al. [28] изучаются различия между двумерным и трехмерным моделированием RANS в определении вентиляции в уличном каньоне. Исследование показывает, что с увеличением длины улицы трехмерное моделирование становится ближе к результатам двумерного. Для того чтобы предсказывать и визуализировать скорость, давление, температуру и концентрацию примесей, CFD использует методы численного решения уравнений Навье-Стокса, описывающих движение жидкости или газа. Например, Lauriks et al. [29] для оценки уровня и распределения загрязнения на одной из главных дорожных артерий в г. Антверпене, Бельгия, использовалась вычислительная гидродинамика (CFD), использовавшая метод усреднения по Рейнольдсу и Навье-Стоксу (RANS), характерный для моделирования атмосферного пограничного слоя.

### Основные положения

В данной статье представлены результаты исследования ветровых потоков и переноса загрязняющих веществ, проведенного с целью прогнозирования экологических условий в жилых кварталах. Мы представляем метод расчета турбулентности SST k-omega в компьютерных моделях численного анализа, а также обсуждаем влияние различных видов барьеров на рассеивание загрязнений в городе.

Использовались уравнения Навье-Стокса для достижения этой цели, так как данные уравнения являются основными для описания движения жидкости и газа. Они учитывают турбулентные потоки, нестационарные и неоднородные потоки и взаимодействие между выброшенными веществами. Для численного моделирования использовался метод SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations).

Результаты доказывают прямую связь между уровнем загрязнения и высотой барьеров. Наличие барьеров определенно уменьшает степень загрязнения, при этом улучшая качество воздуха.

### Физическая постановка задачи

Геометрия улицы выглядит следующим образом. Ставятся различные условия, которые касаются непосредственно барьера, с целью определения его влияния на распределения загрязняющих веществ. Выбрав для него высоту  $H = 1$  м, 2 м и 3 м, мы получили 3 разных результата.

На рисунке 1 представлена улица, на которой проходит исследование. Улица Казыбек би, пересечения от Калдаякова – Казыбек би до Тулебаева – Казыбек би. По правой стороне этой улицы расположен парк размером 18 га, а по правую сторону – жилые дома, комплексы, а также здания университета. Все здания разной высоты: максимальная высота – 42 м (14 этажей), а минимальная высота – 3 м (1 этаж). Данная улица выбрана именно из-за расположения парка с целью наглядно показать его преимущества. Длина улицы составляет 900 м. Другими словами, длина трехмерной модели  $A = 900$  м, ширина  $B = 450$  м, а высота  $H = 100$  м. Концентрация проходит по всей улице Казыбек би, где ее скорость равна  $v = 0.01$  м/с, в то время как поток воздуха двигается с запада на восток со средней скоростью  $v = 5.5$  м/с.

С целью показать различие распространения загрязняющих частиц при разной высоте барьера ставим 10 линий внутри модели, в которых непосредственно и сравниваются результаты количества концентрации (рисунок 2). Первые 5 линий расположены со стороны зданий, в то время как остальные 5 линий находятся со стороны парка.

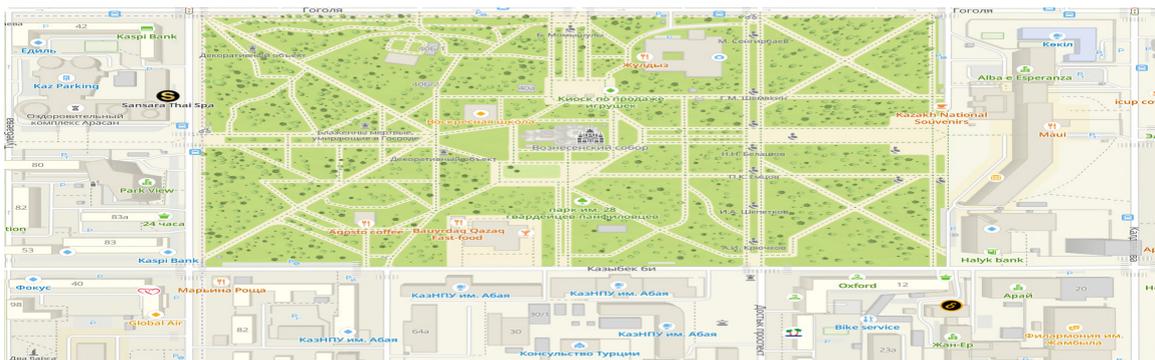


Рисунок 1 – Выбранный участок г. Алматы для исследования.  
Изображение взято из электронного справочника с картами городов «2GIS»

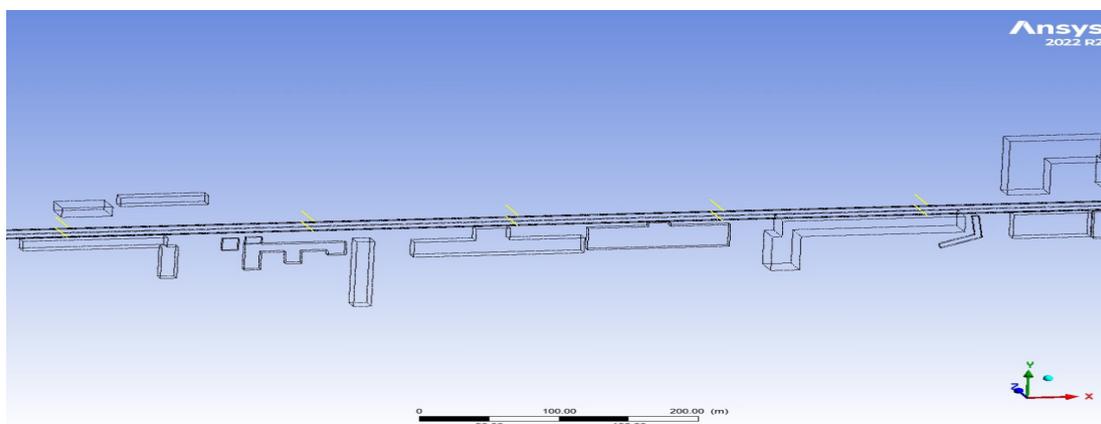


Рисунок 2 – Смоделированная улица г. Алматы

**Материалы и методы**

## Математическая модель

Для описания процесса концентрационной диффузии используется система уравнений, таких как уравнения Навье-Стокса и уравнения концентрации.

$$\nabla \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\nabla \mathbf{u})\mathbf{u} = \frac{1}{\rho} \mathbf{f} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \nabla(\mu_{\text{eff}} \nabla \mathbf{u}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = d_{\text{eff}} \frac{\partial^2 c}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

В данной работе описывается процесс атмосферной диффузии, которая описывается системой уравнений, состоящей из уравнения неразрывности (1), уравнения движения (2) и уравнения концентрации (3). Таким образом, выходит система нелинейных дифференциальных уравнений, которая показана выше.

В компонентной форме уравнение (1) можно записать в следующем виде:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

Где  $u_x, u_y, u_z$  – компоненты вектора скорости в направлениях  $x, y, z$  соответственно;  $\mathbf{u}$  – вектор скорости,  $(\nabla \mathbf{u})\mathbf{u}$  – конвективный член, описывающий изменение скорости из-за движения жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости;  $\mathbf{f}$  – внешняя сила;  $p$  – давление;  $\mu_{\text{eff}}$  – эффективная динамическая вязкость;  $\nabla p$  – градиент давления, описывающий влияние изменения давления на скорость жидкости.  $c$  – концентрация загрязняющих веществ,  $u_j \frac{\partial c}{\partial x_j}$  – конвективный член, описывающий перенос загрязняющих веществ потоком жидкости (суммирование по индексу  $j$  – от 1 до 3).  $d_{\text{eff}}$  – эффективный коэффициент диффузии.

## Турбулентная модель

Для замыкания системы уравнений Навье-Стокса с усреднением по Рейнольдсу (1) – (3) применяется турбулентная модель SST  $k$ - $\omega$  (Shear Stress Transport  $k$ - $\omega$ ). SST  $k$ - $\omega$  модель является универсальной моделью, которая используется для описания широкого спектра турбулентных потоков жидкости. Турбулентная модель работает на основе двух уравнений, описывающих эволюцию двух параметров: усредненной кинетической энергии турбулентности  $k$  и поправки для интенсивности вихрей  $\omega$ .

Уравнения для модели  $k$ - $\omega$  могут быть записаны следующим образом:

1. Уравнение для  $k$  (усредненной кинетической энергии турбулентности):

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + u \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \delta^* \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (4)$$

$k$  – турбулентная кинетическая энергия,  $u_j$  – компоненты вектора скорости,  $P_k$  – продукция турбулентной кинетической энергии,  $\beta^*$  – константа модели,  $\omega$  – специ-

фическая диссипация турбулентной энергии,  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости,  $\delta^*$  – константа модели,  $\mu_t$  – турбулентная вязкость.

2. Уравнение для  $\omega$  (поправки для интенсивности вихрей):

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + u \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (\mu + \delta_{\omega} \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + 2(1 - f_1) \delta_{\omega_2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (5)$$

где:

$$\mu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega_1 S f_2)}$$

$$P_{k_1} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \left( 3 \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} + \rho k \right)$$

$$P_k = \min(P_{k_1}, 10 \beta^* k \omega)$$

$$f_2 = \tanh \left( \left( \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\mu}{y^2 \omega} \right) \right)^2 \right)$$

$$f_1 = \tanh \left( \left( \min \left( \max \left( \frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\mu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\delta_{\omega_2} k}{CD_{k\omega} y^2} \right) \right)^4 \right)$$

$$CD_{k\omega} = \max \left( 2\rho \delta_{\omega_2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega_i}{\partial x_i}, 10^{-10} \right) \quad \phi = \phi_1 f_1 + \phi_2 (1 - f_1)$$

$S$  – скорость деформации,  $f_1$  – функция для переключения между различными режимами модели,  $CD_{k\omega}$  – корректирующий член для  $\omega$ ,  $\phi$  – объединенная функция, зависящая от функции  $f_1$  и  $f_2$ .  $\phi_1$  – значение функции в первой зоне,  $\phi_2$  – значение функции во второй зоне.

Коэффициенты модели:

$$\alpha_1 = 1.0, \quad \alpha_2 = 0.52, \quad \delta_{k_1} = 1.178, \quad \delta_{k_1} = 1.0, \quad \delta_{\omega_1} = 2.0, \quad \delta_{\omega_2} = 1.168,$$

$$a_1 = 0.31, \quad \beta^* = 0.09, \quad \beta_1 = 0.075, \quad \beta_2 = 0.0828$$

Граничные условия

Для этой модели использовались такие виды расчетных областей, как:

- 1) вход 1
- 2) вход 2
- 3) твердая стенка
- 4) симметрические стены
- 5) выход

Граничные условия ставятся для таких переменных, как компоненты скорости, концентрации и давления. Рассмотрим различные граничные условия для каждой категории.

$$\text{Для входа 1: } \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \frac{\partial C}{\partial n} = 0, u = u_0, v = w = 0$$

$$\text{Для входа 2: } \frac{\partial p}{\partial n} = 0, C_z = 1, v = v_0, u = w = 0$$

$$\text{Для твердой стенки: } \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \frac{\partial C}{\partial n} = 0, u = v = w = 0$$

$$\text{Для симметрических стен: } \frac{\partial p}{\partial n} = 0, \frac{\partial C}{\partial n} = 0, \frac{\partial u}{\partial z} = 0, v = w = 0$$

$$\text{Для выхода: } p = 0, \frac{\partial C}{\partial n} = 0, \frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = \frac{\partial w}{\partial n} = 0$$

$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$  — градиент давления в направлении нормали к твердой стенке равен нулю, то есть изменение давления перпендикулярно поверхности стенки отсутствует.  $\frac{\partial C}{\partial n} = 0$  — накопление или поглощение загрязняющих веществ на стенке также отсутствует.  $u = u_0, v = v_0$  — на границе рассматриваемой области компонента скорости  $u, v$  имеет постоянное значение  $u_0, v_0$ .  $C_z = 1$  — концентрация компонента  $Z$  равна 1 на данной границе.  $u, v, w = 0$  — компоненты скорости вблизи заданной области равны нулю.  $\frac{\partial u}{\partial z} = 0$  — градиент компонента скорости не изменяется вдоль оси  $Z$ , что означает, что скорость остается постоянной в этом направлении.  $p = 0$  — на выходе давление равно нулю,  $\frac{\partial u}{\partial n} = \frac{\partial v}{\partial n} = \frac{\partial w}{\partial n} = 0$  — градиент компоненты скорости  $u, v, w$  в направлении нормали к границе равны нулю, чтобы предотвратить искусственные ускорения или замедления потока на выходе, обеспечивая плавный выход.

#### Численный метод и валидация

В настоящей работе уравнение давления дискретизировалось схемой второго порядка, и к нему применялся метод SIMPLE, описывающий течение жидкости и газа. Основные действия данного алгоритма можно рассматривать в трех шагах. Первый шаг — вычисление промежуточных значений скорости, не учитывая поправки давления. Второй шаг — коррекция промежуточных значений скорости с учетом поправки давления. Третий шаг — коррекция скорости с учетом измененных значений давления. Этот алгоритм — один из самых популярных и часто используемых методов для решения уравнений Навье-Стокса благодаря его простоте, устойчивости, хорошей сходимости и применимости к различным задачам.

Для валидации результатов были взяты работа Kikumoto et al. [30], эксперимент которых был проведен с использованием физической модели каньона, которая имела пропорции 1:1 и высоту 1.0 м (рисунок 3, стр. 159).

Для ввода трассирующего газа использовалась линия источника, расположенная в нижней центральной части модели с параметрами 10 мм(х) × 260 мм(у). Трассирующий газ представлял собой смешанный газ, состоящий из синтетического воздуха и этилена (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) в концентрации 1.2%. Скорость ветра измерялась при помощи анемометра, а концентрация газа — с помощью пламенно-ионизационного детектора. Эксперимент проводился в изотермических условиях при скорости притока 1.0 м/с, в то время как скорость концентраций была  $1.923 \times 10^{-2}$  м/с.

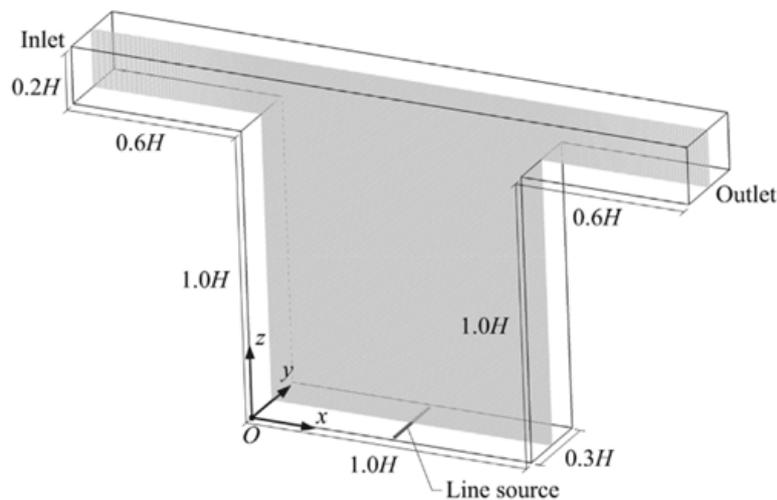


Рисунок 3 – Вычислительная область, используемая для моделирования испытательной камеры

Для оценки точности сетки было выполнено сравнение вертикальной скорости концентрации в трех различных точках (0.05 мм, 0.5 мм и 0.95 мм) в контексте тестовой задачи, которое вы можете увидеть на рисунке 4. Изображенные на рисунке 5 (a, b, c) результаты контура средней концентрации показали, что отличия между нашими результатами и данными прежде упомянутого исследования (exp, LES2 и LES4) оказались незначительными. Также сравнение контуров средней скорости показало незначительную разницу с экспериментальными результатами на рисунке 6. Получив удовлетворительные результаты, данный подход выполняется для основной задачи.

Для моделирования и получения таких результатов необходимо использовать определенные программные обеспечения. В данной работе использовался Ansys Fluent 2022. Ansys позволяет моделировать потоки жидкостей и газов, исследовать турбулентные течения, рассеивания тепла и массопереноса. Его применение помогает снизить затраты и ускорить процесс разработки.

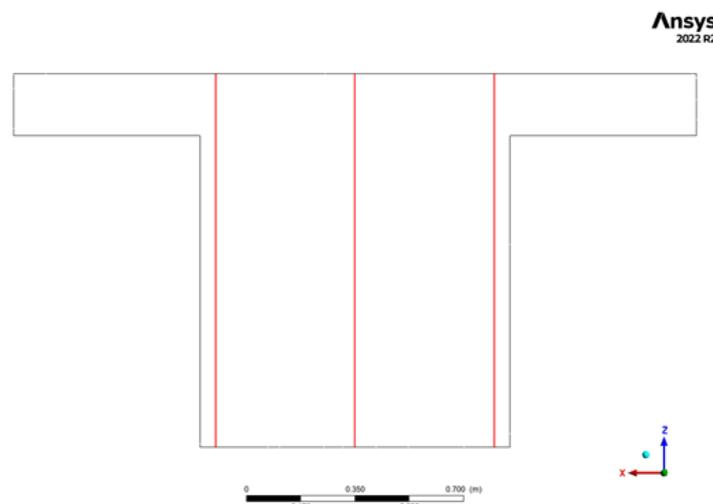


Рисунок 4 – Три контрольные точки в полости для более детального изучения

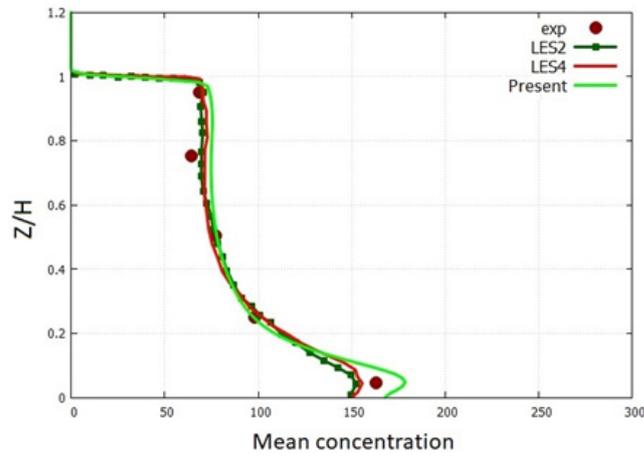


Рисунок 5(а) – Контур средней концентрации на линии 0.05 mm

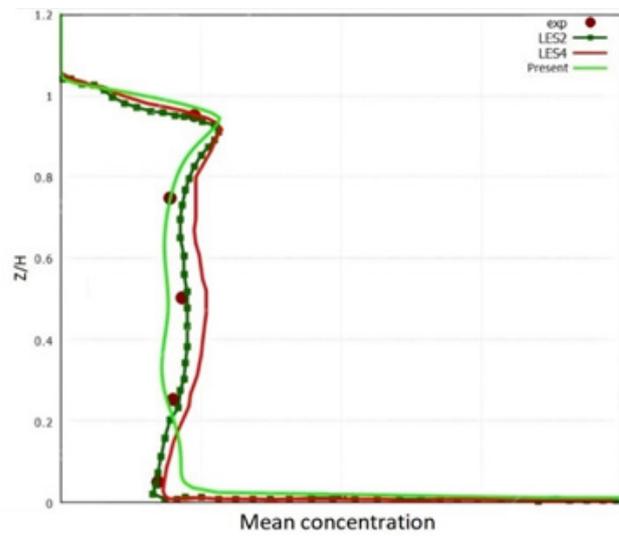


Рисунок 5(б) – Контур средней концентрации на линии 0.5 mm

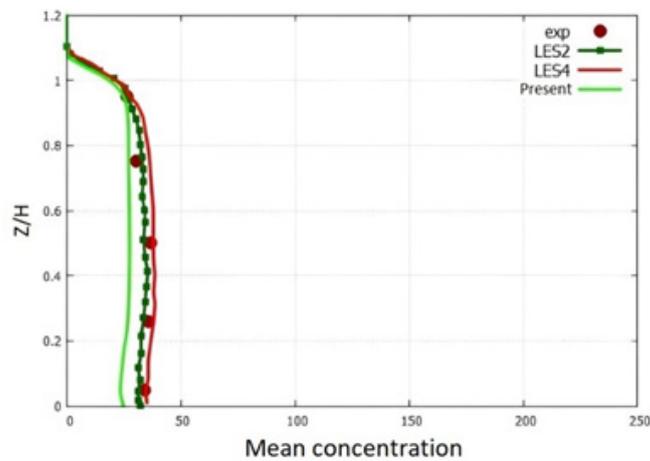


Рисунок 5(с) – Контур средней концентрации на линии 0.95 mm

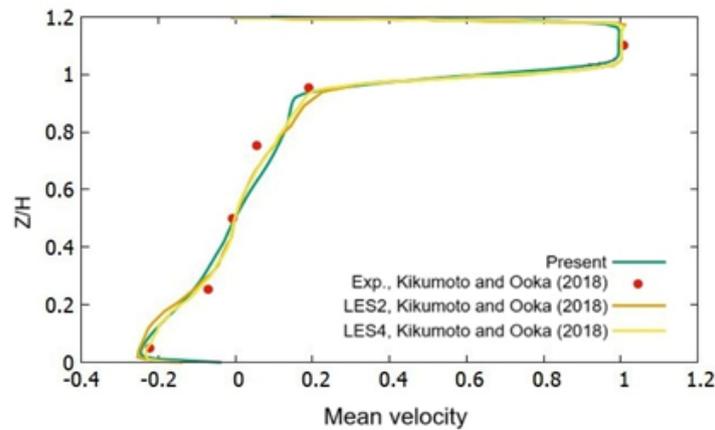


Рисунок 6 – Профили скорости

### Результаты и обсуждения

При построении сетки получились результаты, которые показаны ниже. Можно заметить, что сетка построена плотнее в тех областях, где важно учитывать концентрацию. Самая мелкая сетка – на линии выброса концентрации и сетка для барьеров, благодаря которой определяется влияние их присутствия (рисунок 7). Размер сетки для зданий также важно учитывать, так как именно по ним определяется дальнейшее распределение загрязняющих веществ и их влияние на находящихся в них людей (рисунок 8). Сетка для остальной геометрии не обязательно должна быть слишком мелкой, поэтому она является самой крупной по сравнению с другими (рисунок 9).

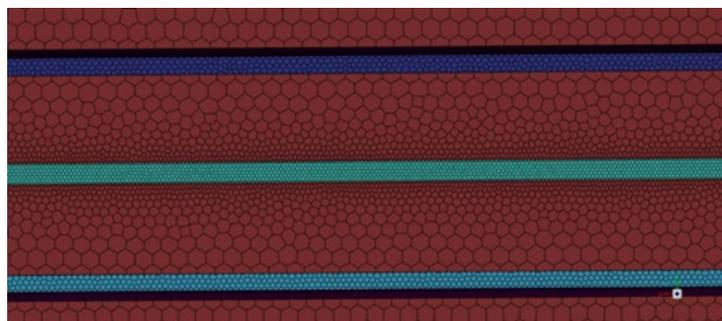


Рисунок 7 – Сетка для барьеров и дороги, откуда выбрасывается концентрация



Рисунок 8 – Сетка вокруг зданий

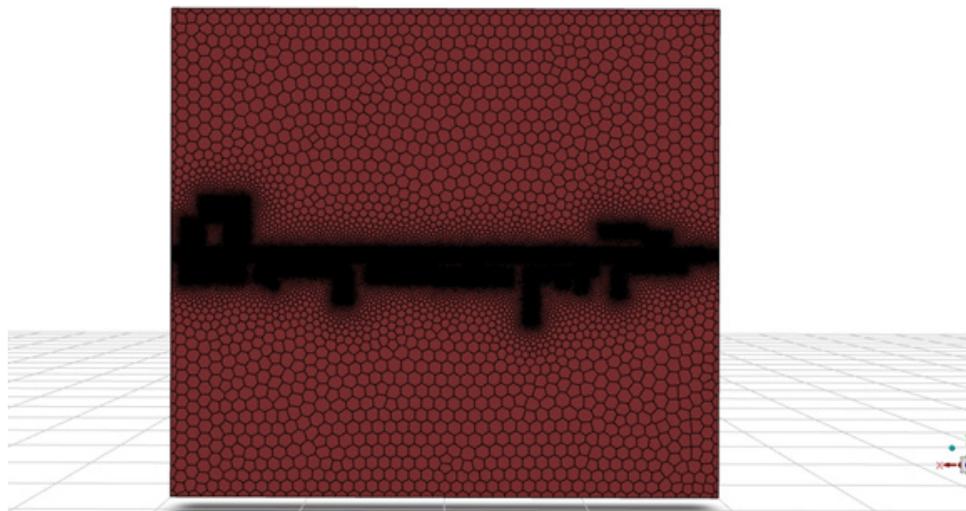


Рисунок 9 – Сетка для всей поверхности

Выбрав высоту барьера  $H = 1$  м, 2 м и 3 м, мы получили три разных результата. По завершении задачи мы получили такие результаты контуров средней концентрации, что вы видите на рисунке 10 (a-j). На основании этих результатов можно сделать вывод о значительном влиянии высоты барьера на распространение загрязнения. В основном барьеры высотой 3 м показывают наилучшие результаты. На рисунках 10 (f), 10 (j) наблюдаются небольшие различия в распределении загрязнения на высотах 2 м и 3 м, что указывает на возможность использования барьеров высотой 2 м в этих местах. Это, в свою очередь, позволяет оптимизировать использование таких ресурсов, как время и бюджет. На рисунке 10 (g) наблюдается противоположный результат, где барьер высотой 3 м показывает самое высокое значение концентраций. Это может быть связано с тем, что данная линия находится со стороны парка. Парк сам по себе влияет на уменьшение распространения загрязнения, и, возможно, наличие барьеров перед ним негативно влияет на уменьшение распространения концентрации. Ведь барьеры могут изменять направление и скорость воздушного потока вокруг них, что может привести к созданию вихрей или областей низкого давления, что, в свою очередь, может способствовать задержанию загрязнений в определенных областях.

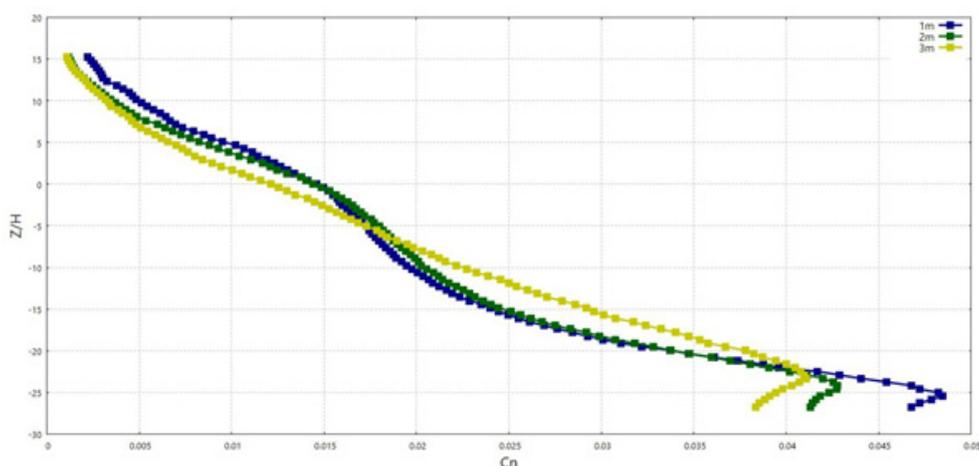


Рисунок 10 (a) – Контур средней концентрация для линий 1

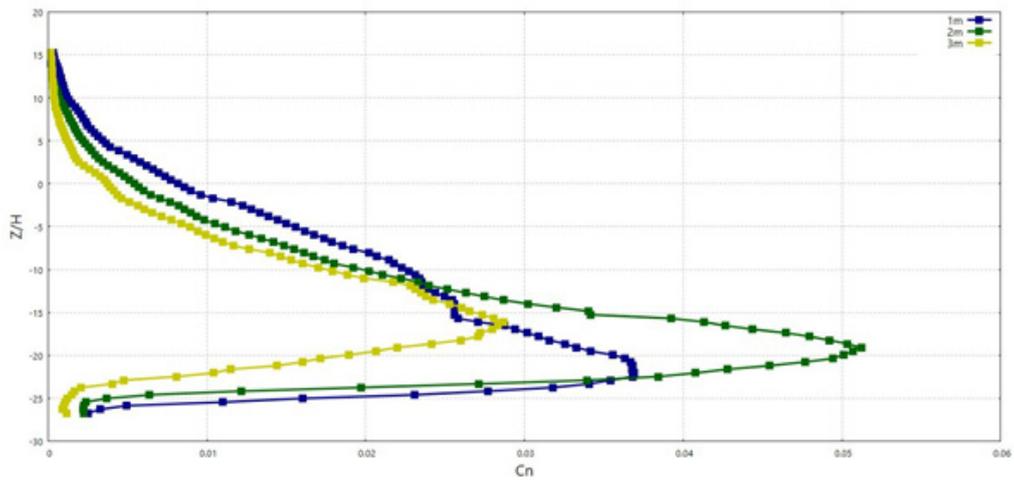


Рисунок 10 (b) – Контур средней концентрации для линий 2

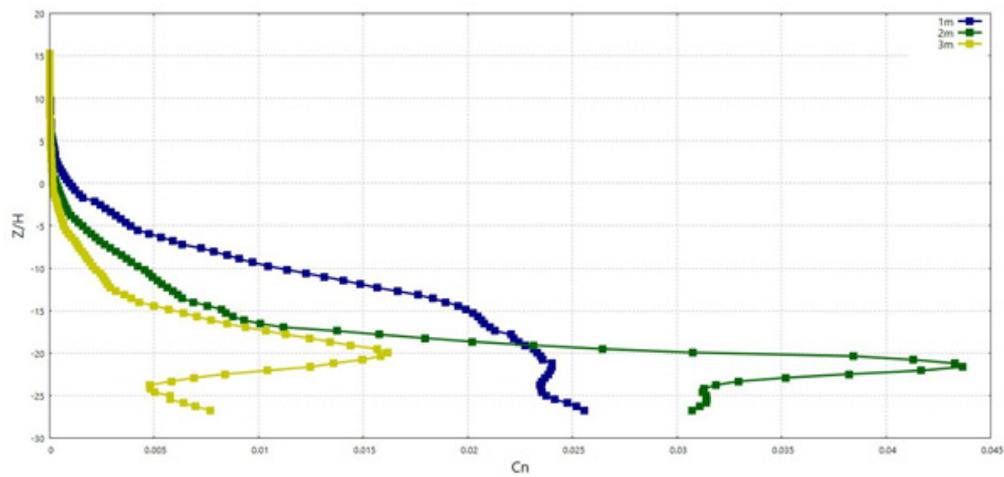


Рисунок 10 (c) – Контур средней концентрации для линий 3

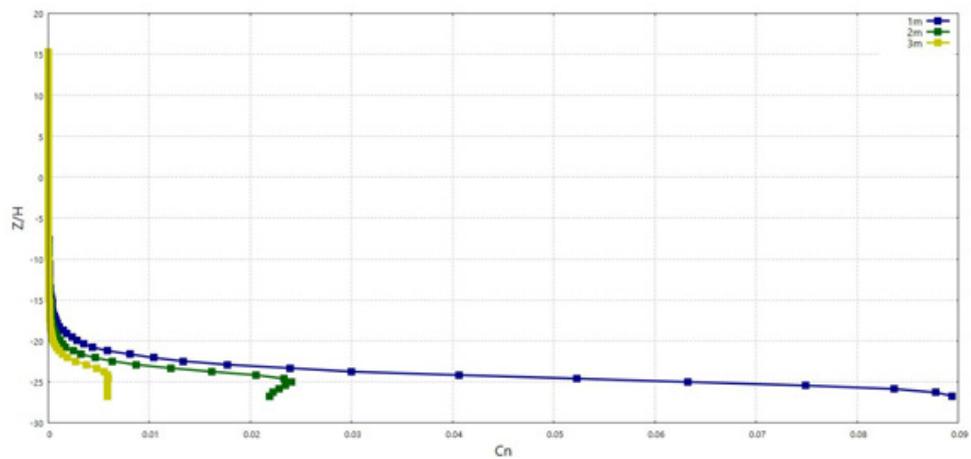


Рисунок 10 (d) – Контур средней концентрации для линий 4

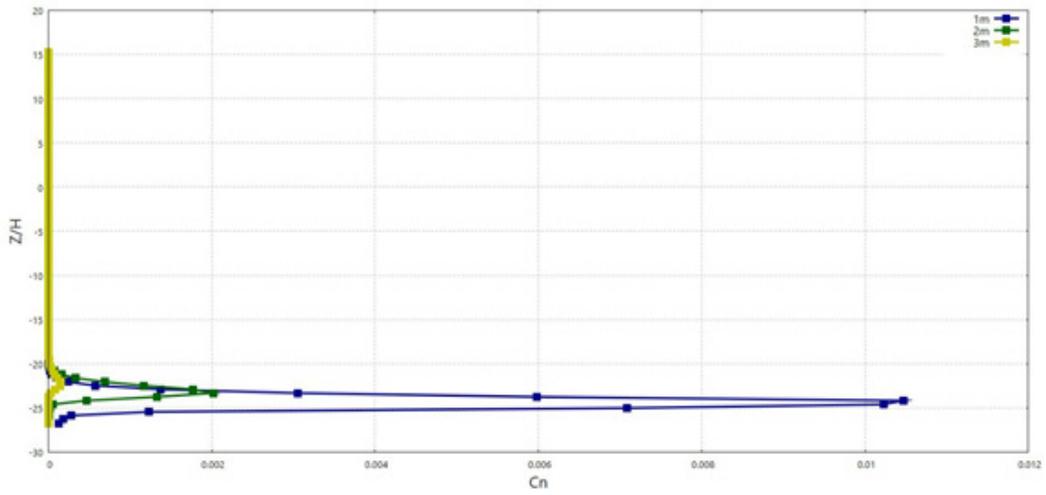


Рисунок 10 (е) – Контур средней концентрация для линий 5

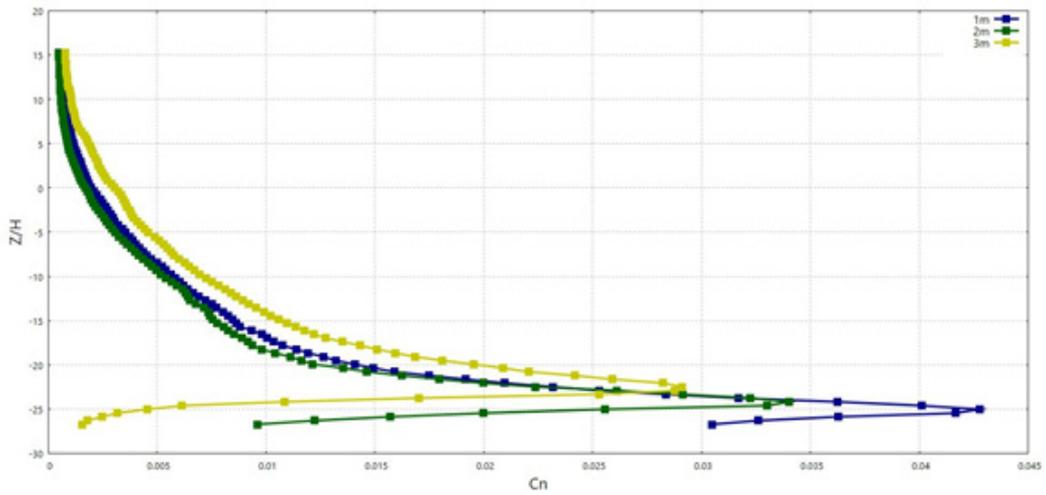


Рисунок 10(f) – Контур средней концентрация для линий 6

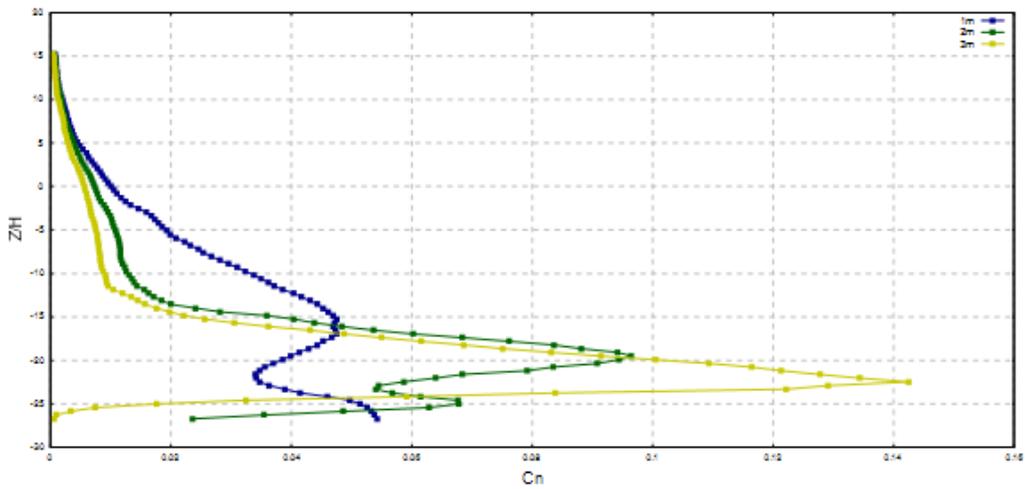


Рисунок 10 (g) – Контур средней концентрация для линий 7

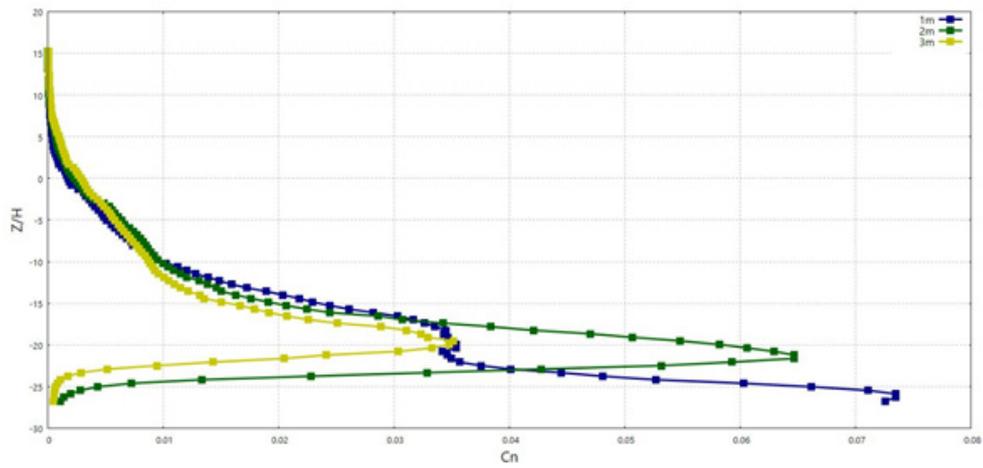


Рисунок 10 (h) – Контур средней концентрация для линий 8

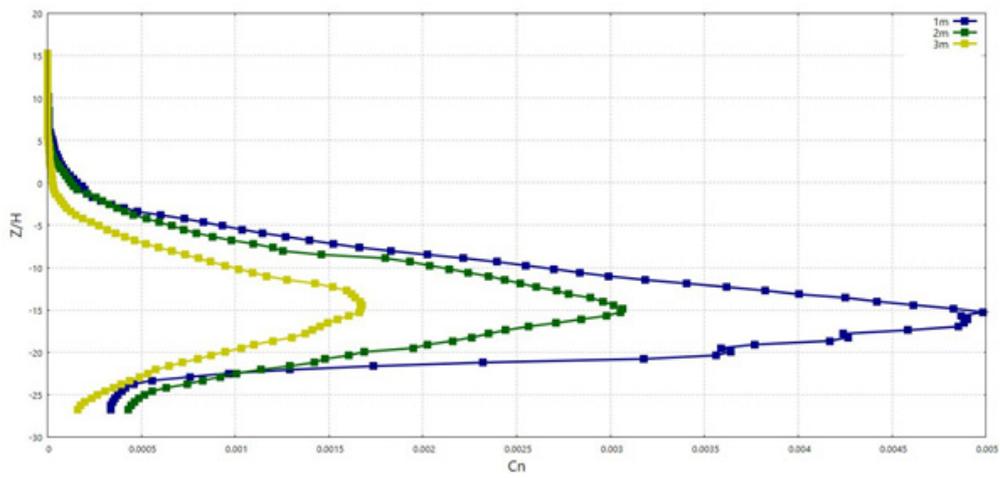


Рисунок 10 (i) – Контур средней концентрация для линий 9

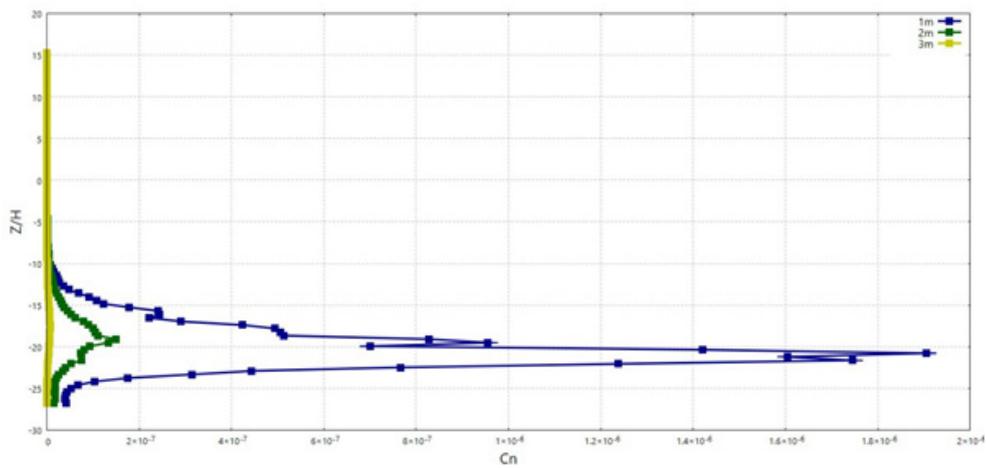


Рисунок 10 (j) – Контур средней концентрация для линий 10

## Заключение

Данное исследование посвящено загрязнению воздуха в уличном каньоне в г. Алматы, Казахстан. Цель исследования – проанализировать уровень загрязнения воздуха для разработки стратегий и методов городского планирования. Полученные результаты послужат основой для принятия плановых и экологических решений, направленных на улучшение качества окружающей среды и здоровья населения.

Урбанизация создала серьезные проблемы для горожан: пробки на дорогах, смог и отсутствие ветра ухудшили условия жизни. Чтобы решить эти проблемы, необходимо соблюдать стандарты городского дизайна, такие как расположение и расстояние между зданиями, парками и зелеными зонами.

Была выявлена значимость выбросов этилена в результате движения транспорта в г. Алматы. Для этого была выбрана улица, расположенная вдоль городского парка и различных зданий. Такая улица была выбрана с целью выявить влияние парка на распространение загрязнений. Были продемонстрированы различные вариации барьера вдоль дороги, чтобы сравнить их влияние на проникновение концентрации на пешеходную зону. По полученным результатам можно сделать несколько выводов:

- ♦ высокие препятствия могут направлять поток воздуха в определенном направлении, вызывая изменения скорости и направления. Это может быть полезно для перенаправления загрязняющих веществ в направлении, где они будут менее вредны для окружающей среды или людей;

- ♦ барьеры с высотой 3 м дали наилучшие результаты в уменьшении распространения концентрации, но в некоторых районах барьеры высотой 2 м дают также неплохие результаты. Это значит, что для экономии ресурсов можно использовать и такую высоту.

Исследование показало, что при планировании и проектировании густонаселенных городских районов необходимо учитывать стратегии по снижению рассеивания загрязняющих веществ. В настоящее время транспортные выбросы в городах, как правило, концентрируются в уличных каньонах. Если не изменить существующие методы планирования и проектирования, то в будущем по мере роста города эта проблема будет усугубляться. Учитывая негативное влияние загрязнения воздуха на здоровье населения и высокую плотность населения в г. Алматы, важно разработать и внедрить стратегии по снижению этого негативного воздействия.

## Благодарности

Работа поддержана грантом Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (AP19677972).

## ЛИТЕРАТУРА

1 <https://www.iqair.com/ru/kazakhstan>

2 Feng W. and Yuan H. (2022) The pain of breathing: how does haze pollution affect urban innovation, *Environmental science and pollution research international*, vol. 29(28), pp. 42664–42677. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18279-4>

3 Monitoring air pollution levels is key to adopting and implementing WHO's Global Air Quality Guidelines, <https://www.who.int/news/item/10-10-2023-monitoring-air-pollution-levels-is-key-to-adopting-and-implementing-who-s-global-air-quality-guidelines>

4 Wang Y., Zhou Y., Zuo J. and Rameezdeen R. (2018) A Computational Fluid Dynamic (CFD) Simulation of PM10 Dispersion Caused by Rail Transit Construction Activity: A Real Urban Street Canyon Model. *International journal of environmental research and public health*, vol. 15(3), p. 482. <https://doi.org/10.3390/ijerph15030482>

5 Hasunuma H., Ishimaru Y., Yoda Y. and Shima M. (2014) Decline of ambient air pollution levels due to measures to control automobile emissions and effects on the prevalence of respiratory and allergic disorders among children in Japan, *Environmental research*, vol. 131, pp. 111–118. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2014.03.007>

6 Yuan Chen, C.-Y. Cynthia Lin Lawell and Yunshi Wang (2020) The Chinese automobile industry and government policy, *Research in Transportation Economics*, 84, 100849. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100849>

7 Parida S., Sahu K.C., Sahoo B.B., Pandey V.S., Thatoi D.N., Nayak N. and Nayak M.K. (2023) High performance supercapacitor electrodes from automobile soots: An effective approach to control environmental pollution, *Inorganic Chemistry Communications*, vol. 158, p.111671. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111671>

8 Issakhov A., Abylkassymova A. (2023) Numerical analysis of solid barrier heights and trees with porosity properties influence on the automobile's emission dispersion in the residential area, *Ecological Modelling*, vol. 484, p. 110395. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2023.110395>

9 Badach J., Wojnowski W. and Gębicki J. (2023) Spatial aspects of urban air quality management: Estimating the impact of micro-scale urban form on pollution dispersion, *Comput. Environ. Urban Syst.*, vol. 99, p. 101890. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2022.101890>

10 Arnab Jana, Ahana Sarkar and Ronita Bardhan (2020) Analysing outdoor airflow and pollution as a parameter to assess the compatibility of mass-scale low-cost residential development, *Land Use Policy*, vol. 99, p. 105052. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2020.105052>

11 Ze Liang, Jiao Huang, Yueyao Wang, Feili Wei, Shuyao Wu, Hong Jiang, Xuliang Zhang and Shuangcheng Li (2021) The mediating effect of air pollution in the impacts of urban form on nighttime urban heat island intensity, *Sustainable Cities and Society*, vol. 74, p. 102985. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102985>

12 Zhenlan Gao, Raphaël Bresson, Yongfeng Qu, Maya Milliez, Cecile de Munck and Bertrand Carissimo. (2018) High resolution unsteady RANS simulation of wind, thermal effects and pollution dispersion for studying urban renewal scenarios in a neighborhood of Toulouse, *Urban Climate*, vol. 23, pp. 114–130. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.11.002>

13 Zhengtong Li, Tingzhen Ming, Shurong Liu, Chong Peng, Renaud de Richter, Wei Li, Hao Zhang and Chih-Yung Wen. (2021) Review on pollutant dispersion in urban areas-part A: Effects of mechanical factors and urban morphology, *Building and Environment*, vol. 190, p. 107534. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107534>

14 Shi J., Miao W., Si H. and Liu T. (2021) Urban Vitality Evaluation and Spatial Correlation Research: A Case Study from Shanghai, China. *Land*, vol. 10(11), p. 1195. <https://doi.org/10.3390/land10111195>

15 Zhengtong Li, Hao Zhang, Yu-Hsuan Juan, Yee-Ting Lee, Chih-Yung Wen and An-Shik Yang (2023) Effects of urban tree planting on thermal comfort and air quality in the street canyon in a subtropical climate, *Sustainable Cities and Society*, vol. 91, p. 104334. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104334>

16 Lu Zhang, Zhiqiang Zhang, Chaoyang Feng, Meirong Tian and Yanni Gao (2021) Impact of various vegetation configurations on traffic fine particle pollutants in a street canyon for different wind regimes, *Science of The Total Environment*, vol. 789, p. 147960. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147960>

17 Qin H., Hong B., Jiang R., Yan S. and Zhou Y. (2019) The Effect of Vegetation Enhancement on Particulate Pollution Reduction: CFD Simulations in an Urban Park, *Forests*, vol. 10(5), p. 373. <https://doi.org/10.3390/f10050373>

18 Craig K.J., de Kock D.J. and Snyman J.A. (2001) Minimizing the effect of automotive pollution in urban geometry using mathematical optimization, *Atmospheric Environment*, vol. 35, pp. 579–587. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00307-1](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00307-1)

19 Gergely Kristóf, Péter Füle (2017) Optimization of urban building patterns for pollution removal efficiency by assuming periodic dispersion, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 162, pp. 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.01.011>

20 Xavier Jurado, Nicolas Reiminger, José Vazquez and Cédric Wemmert (2021) On the minimal wind directions required to assess mean annual air pollution concentration based on CFD results, *Sustainable Cities and Society*, vol. 71, p. 102920. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102920>.

21 Fusuo Xu, Zhi Gao and Jianshun Zhang (2022) Effects of roadside morphologies and moving vehicles on street canyon ventilation, *Building and Environment*, vol. 218, p. 109138. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109138>.

22 Francisco Toja-Silva, Carla Pregel-Hoderlein and Jia Chen (2018) On the urban geometry generalization for CFD simulation of gas dispersion from chimneys: Comparison with Gaussian plume model, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 177, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.04.003>.

23 Xiangwen Fu, Junfeng Liu, George A. Ban-Weiss, Jiachen Zhang, Xin Huang, Bin Ouyang, Olalekan Popoola and Shu Tao. (2017) Effects of canyon geometry on the distribution of traffic-related air pollution in a large urban area: Implications of a multi-canyon air pollution dispersion model, *Atmospheric Environment*, vol. 165, pp. 111–121. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.06.031>.

24 Li H., Chen W. and He W. (2015) Planning of Green Space Ecological Network in Urban Areas: An Example of Nanchang, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 12(10), pp. 12889–12904. <https://doi.org/10.3390/ijerph121012889>

25 Jose-Luis Santiago, Riccardo Buccolieri, Esther Rivas, Hector Calvete-Sogo, Beatriz Sanchez, Alberto Martilli, Rocio Alonso, David Elustondo, Jesús M. Santamaría and Fernando Martin (2019) CFD modelling of vegetation barrier effects on the reduction of traffic-related pollutant concentration in an avenue of Pamplona, Spain, *Sustainable Cities and Society*, vol. 48, pp. 101559. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101559>.

26 Ioannidis G., Li C., Tremper P., Riedel T and Ntziachristos L. (2024) Application of CFD Modelling for Pollutant Dispersion at an Urban Traffic Hotspot, *Atmosphere*, vol. 15(1), p.113. <https://doi.org/10.3390/atmos15010113>

27 Nguyen VT., Nguyen TC. and Nguyen J. (2019) Numerical Simulation of Turbulent Flow and Pollutant Dispersion in Urban Street Canyons. *Atmosphere*, 10, 683. <https://doi.org/10.3390/atmos10110683>

28 Shuo-Jun Mei, Zhiwen Luo, Fu-Yun Zhao and Han-Qing Wang (2019) Street canyon ventilation and airborne pollutant dispersion: 2-D versus 3-D CFD simulations, *Sustainable Cities and Society*, vol. 50, p. 101700. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101700>

29 Tom Lauriks, Riccardo Longo, Donja Baetens, Marco Derudi, Alessandro Parente, Aurélie Bellemans, Jeroen van Beeck and Siegfried Denys (2021) Application of Improved CFD Modeling for Prediction and Mitigation of Traffic-Related Air Pollution Hotspots in a Realistic Urban Street, *Atmospheric Environment*, vol. 246, p. 118127. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.118127>

30 Hideki Kikumoto, Ryoza Ooka (2018) Large-eddy simulation of pollutant dispersion in a cavity at fine grid resolutions, *Building and Environment*, vol. 127, pp. 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.11.005>

**<sup>1\*</sup>Нығметова Ә.,**

магистрант, ORCID ID: 0009-0004-5395-4569, e-mail: a.nygmetova@kbtu.kz

**<sup>1</sup>Исахов А.,**

профессор, ORCID ID: 0000-0002-1937-8615, e-mail: alibek.issakhov@gmail.com

<sup>1</sup>Қазақстан-Британ техникалық университет, 050000, Алматы қ., Қазақстан

## **ЕЛДІ МЕКЕНДЕРДІҢ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ЖАҒДАЙЫН БОЛЖАУ МАҚСАТЫНДА ЖЕЛ АҒЫНЫН ЖӘНЕ ЛАСТАУШЫ ЗАТТАРДЫҢ ТАСЫМАЛДАНУЫН МАТЕМАТИКАЛЫҚ МОДЕЛЬДЕУ**

### **Аңдатпа**

Бұл зерттеу көліктердің шығарындылары әсерінен Қазақстан, Алматы қаласында ластаушы заттардың турбулентті дисперсиясын талдауға бағытталған. Қоршаған ортаның және ғимараттың ластаушы заттардың, бұл жағдайда этиленнің концентрациясының дисперсиясына әсері зерттелді. Қаладағы бар көшені дәл сипаттау үшін үш өлшемді макет салынды. Турбулентті ауа ағыны мен концентрациясы қуыстағы конвекцияның математикалық моделі арқылы зерттелді және SST k-omega әдісімен шешілді. Жылдамдық-кон-

центрация қатынасын шешу үшін SIMPLE алгоритмі қолданылды. Алынған нәтижелер мен белгілі сынақ деректерін салыстыру кезінде анықталған нәтижелердің ұқсастығы қолданылатын әдістер мен алгоритмдердің дұрыстығын көрсетті. Қорытындылай келе, ластаушы заттардың таралу нәтижелері әртүрлі биіктіктегі бөгет болған жағдайда талданды: 1м, 2м және 3м. Нәтижелер тосқауылдың болуы ластаушы заттардың сақталуына оң әсер ететінін көрсетеді. Сондай-ақ бұл кедергілердің биіктігі маңызды рөл атқарады, сондықтан жоспарлау және салу модельдеу нәтижелеріне және берілген аумақтың ерекшеліктеріне негізделуі керек. Бұл барлық жағдайлар үшін бір және бір уақыттағы концентрация мөлшерінің айтарлықтай айырмашылығымен дәлелденеді.

**Түйін сөздер:** Ауаның ластануы, көше шатқалы, SST k-omega, жоғары концентрация, кедергілер.

**<sup>1</sup>\*Nygmetova A.,**

Master's student, ORCID ID: 0009-0004-5395-4569, e-mail: a.nygmetova@kbtu.kz

**<sup>1</sup>Issakhov A.A.,**

Professor, ORCID ID: 0000-0002-1937-8615, e-mail: alibek.issakhov@gmail.com

<sup>1</sup>Kazakh-British technical university, 050000, Almaty, Kazakhstan

## **MATHEMATICAL MODELING OF THE WIND FLOW AND THE TRANSFER OF POLLUTANTS IN ORDER TO PREDICT THE ENVIRONMENTAL SITUATION IN RESIDENTIAL AREAS**

### **Abstract**

This study aims to analyze the turbulent dispersion of pollutants in the city of Almaty, Kazakhstan, caused by vehicle emissions. The influence of the environment and building on the dispersion of pollutant concentration, in this case ethylene, was studied. A three-dimensional model was built to accurately describe an existing street in the city. Turbulent air flow and concentration was investigated using a mathematical model of convection in a cavity and was solved using the SST k-omega method. SIMPLE algorithm was applied to solve the velocity-concentration relationship. When comparing between the obtained results and known test data, the similarity of the identified results showed the correctness of the methods and algorithms used. In summary, the results of pollutant spreading were analyzed in the presence of a barrier of different heights: 1m, 2m and 3m. The findings indicate that the presence of barrier has a positive effect on the retention of pollutants. Also the height of these barriers plays an important role, so the planning and construction should be grounded on the outcomes of modeling and peculiarities of the given territory. This is proved by the marked differences in the amount of concentration at one and the same moment of time for all cases.

**Key words:** Air pollution, urban street canyon, SST k-omega, high concentration, barriers.